



26
Agosto 2022

Conservación de recursos naturales: de los genes al suelo

DIRECTORIO

OIKOS=, Año 5, No. 26 (agosto 2022) es una publicación cuatrimestral, editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Unidad de Divulgación y Difusión del Instituto de Ecología, Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México, Tel. (55)5622-9002, correo electrónico: cequihua@iecologia.unam.mx, http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/. Editor responsable: Luis Enrique Eguiarte Fruns. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-111710202000-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Certificado de Licitud de Título y Contenido: en trámite, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

Distribuido por: Instituto de Ecología, UNAM. Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México. Ejemplar gratuito.

Fotografía de portada: Flores de sahuaro (*Carnegiea gigantea*) en la Reserva de la Biósfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar, Sonora, México. Clementina Equihua Zamora.











22





Agosto 2022

CONTENIDO

DE LOS EDITORES

De los genes al suelo, o la conservación de los recursos naturales
Luis E. Eguiarte y Clementina Equihua Z. 4

ARTÍCULOS

La epigenética rompe los paradigmas de la herencia genética
Atzhiry D. Vigueras-Enciso, César E. Pacheco-Morales y María de la Paz Sánchez 6

Las dioscóreas, la ecología y la industria en México (1942-1959)
Rosa Jimena Rey Loaiza 11

Los gigantes centenarios del desierto de Sonora y Arizona
Luis E. Eguiarte y Clementina Equihua Z. 14

Importancia de los conocimientos tradicionales e indígenas
Jorge Soberón 18

La conectividad del paisaje y su importancia para los mamíferos de la Ciudad de México
Pablo César Hernández Romero, Carlos E. Muench Spitzer, Diego Magaña Rodríguez, María del Coro Arizmendi y David A. Prieto Torres 21

Del origen del Universo al origen del suelo
Jorge D. Etchevers y Juan F. Gallardo 26

Del progresivo impacto de *Homo sapiens sapiens* sobre el suelo
Jorge D. Etchevers y Juan F. Gallardo 31



De los editores

De los genes al suelo, o la conservación de los recursos naturales

Luis E. Eguiarte y Clementina Equihua Z.

Cuando pensamos en conservación, usualmente pensamos en especies tan emblemáticas como el oso panda o espectaculares como las ballenas y las monarcas. Pero hay otras escalas de la biodiversidad que usualmente no pensamos sean relevantes para incluirlas en las estrategias de conservación. Por ejemplo, cada vez queda más claro que es importante considerar a los genes, ya que, desde un punto de vista teórico, representan la base genética de la adaptación, como vamos a discutir en una futura entrega de *Oikos=* (el número 27). Mantener la diversidad en los genes va a ser crítico para que los organismos se adapten al cambio climático brutal que ya estamos experimentando. Pero además, estos genes representan un acervo genético que podemos utilizar para mejorar, a su vez, a las especies que ya usamos y para todo tipo de nuevos usos. A veces no se le da la importancia necesaria a este acervo que será el cimiento para que los organismos se adapten, sobrevivan en nuevos ambientes y puedan resistir enfermedades emergentes y novedosos enemigos naturales. La adaptación es un aspecto central del proceso evolutivo y hoy más que nunca necesitamos asegurar que la biodiversidad se adapte al mundo que hemos cambiado con nuestras actividades.

Pero la genética y sus mecanismos son complicados. Recientemente ha tenido mucho desarrollo el novedoso campo de la epigenética, donde vemos que no solo el ADN es relevante para la herencia sino que puede haber mecanismos (recientemente descritos) que regulan no solo la expresión de los genes en el desarrollo de un organismo, sino también cómo se hereda esa expresión. Esta herencia epigenética puede ser crítica para la adaptación a corto, mediano y aun a largo plazo. Atzhiry Vigueras-Enciso, César E. Pacheco-Morales y la Dra. María de la Paz Sánchez, de nuestro Instituto, nos describen con mucho cuidado, este fascinante proceso genético, que nos ayuda a celebrar el bicentenario del nacimiento de Gregor Mendel, fundador del estudio de la genética (https://gregormendel200.org/).

Efectivamente, las especies son importantes por sí mismas, no solo por sus genes, sino por sus propiedades emergentes, como su ecología y fisiología. En su artículo, Jimena Rey, de nuestro Instituto, nos demuestra esto revisando la historia del barbasco, plantas nativas de nuestras selvas y bosques y su relevancia como recurso genético. Varias especies del género *Dioscorea* son utilizadas de distintas maneras en las zonas tropicales del mundo y algunas de ellas son fuentes de compuestos químicos. *Dioscorea mexicana* o barbasco fue muy importante en el desarrollo de la píldora anticonceptiva, una verdadera revolución para la sociedad humana. Al mismo tiempo, la historia del barbasco es muy relevante para entender los orígenes del nuestro Instituto. Invitamos a los lectores a explorar estos aspectos leyendo este breve texto.

Otra especie carismática de la flora mexicana es el sahuaro, como lo describimos en la revisión del libro *The saguaro cactus. A natural history* de David Yetman, Alberto Búrquez, Kevin Hultine, Michael Sanderson y Frank S. Crosswhite publicado en el 2020, al inicio de la pandemia. Este libro nos ilustra sobre ecología, evolución, genética y los usos tradicionales de la especie. Los recursos genéticos y biológicos que representan las especies y sus poblaciones están íntimamente relacionados con los conocimientos tradicionales sobre sus usos, manejo y relevancia ambiental. ¿Cómo estudiar estos conocimientos tradicionales? Un punto crítico para nuestro país es ¿a quién le pertenecen esos conocimientos? Estas preguntas tan complicadas las aborda el Dr. Jorge Soberón, entusiasta colaborador de *Oikos=* y actual director del Museo de Historia Natural de la Universidad de Kansas, EUA.

Las especies son más que sus genes, y su conservación aun en ambientes muy alterados es importante. Un fascinante estudio sobre los mamíferos silvestres que aún se encuentran en la Ciudad de México, y el efecto crítico de la conectividad en el paisaje, se describe en el artículo que nos compartieron Pablo César Hernández Romero, María del Coro Arizmendi y colaboradores de la Facultad de Estudios Superiores (FES) Iztacala-UNAM. Ellos reportan datos de 64 especies de mamíferos en la Ciudad de México, principalmente de roedores, murciélagos y carnívoros.

El suelo, como lo mencionamos en el editorial del *Oikos=* anterior (número 25), es la última frontera de la investigación ecológica moderna, y debe ser entendido como una entidad muy compleja , dinámica y variable, con un muy diverso componente biótico. Pero además, el suelo es un recurso ecológico que se puede degradar y perder, por lo que también es crítica su conservación, manejo y restauración. Los doctores Jorge D. Etchevers y Juan F. Gallardo, del Colegio de Postgraduados (Texcoco) y de la Universidad de Salamanca (jubilado), respectivamente, en dos artículos nos dan una amplia visión de los

suelos, desde el origen de los elementos que los conforman hasta su progresiva degradación a partir de muchas prácticas recientes de manejo.

Aprovechamos estas últimas líneas para agradecer a nuestras autoras y autores, así como a las y los lectores la paciencia y compresión debido a los retrasos que nuestra publicación ha sufrido con la reciente pandemia. Queremos asegurarles que *Oikos=* sigue activa y con mucho entusiasmo. Los esperamos en el siguiente número (*Oikos=* 27), en donde entre otras cosas, tendremos una dinámica colección sobre el papel que jugó Richard Lewontin en el desarrollo de las ciencias biológicas, especialmente para la genética evolutiva moderna.



Paisaje. Ilustración de Eunice Kariñho Betancourt.

Artículos

La epigenética rompe los paradigmas de la herencia genética

Atzhiry D. Vigueras-Enciso, César E. Pacheco-Morales y María de la Paz Sánchez

¿Qué es la epigenética?

El término "epigenética" proviene del griego, conformado por el prefijo "epi", que significa "por encima", el término "genos", que quiere decir "que genera" o "da origen", y el sufijo "ike", que se utiliza para indicar "relativo a" o "estudio". Fue acuñado en 1942 por el paleontólogo y genetista escocés Conrad H. Waddington para describir la interacción de los genes con el medio ambiente que origina un fenotipo, independientemente de las variaciones genéticas. Este término fue planteado para entender por qué con frecuencia las variaciones genéticas y fenotípicas están desacopladas, es decir, los rasgos genéticos no se manifiestan como sería de esperar. Es importante señalar que en esa época aún no había una descripción de los genes ni del material genético como la conocemos en la actualidad, por lo que el término fue poco usado en las primeras tres décadas de su existencia. No fue hasta 1980 que se retomó y una década después se describió a la epigenética como la suma de los factores genéticos y no genéticos que actúan en las células para controlar selectivamente la expresión génica que dirige la compleja formación de un fenotipo durante el desarrollo.

En la actualidad se han agregado diversos conceptos a la definición original; ahora entendemos la epigenética como *el estudio de los cambios en la función de un gen que no se atribuyen a modificaciones en la secuencia de ADN y que son heredables*. A diferencia de la genética, estos cambios son generalmente asociados a modificaciones en la estructura de la cromatina (Figura 1A). La cromatina es el material genético (ADN) empaquetado alrededor de las ahora famosas proteínas histonas, que en conjunto con otras proteínas no histonas dan estructura y organizan el ADN.

Antes del surgimiento de la epigenética se tenía la idea de que el fenotipo (es decir, los rasgos físicos o caracteres que exhiben los organismos) era determinado solo por las secuencias de ADN (sus genes), es decir, por su genotipo. Ahora se sabe que tanto el genotipo como la epigenética, en interacción con el medio ambiente, contribuyen en la generación de un fenotipo. Por esto, la epigenética se ha convertido en un área de investigación muy activa en todo tipo de organismos.

El concepto de epigenética se entiende mejor con la descripción de lo que ocurre con los gemelos monocigóticos o considerados idénticos. Estos se forman a partir de un solo cigoto o célula fecundada, que se divide para producir dos individuos con genomas idénticos. A menudo se tiene la idea errónea de que los gemelos son idénticos en cualquier aspecto, pero a lo largo de su desarrollo se van fijando ciertas diferencias fenotípicas, como puede ser la susceptibilidad a enfermedades o incluso la manifestación de una amplia gama de caracteres físicos. Estas diferencias fenotípicas se deben a que a lo largo de la vida, cada individuo se somete a diferentes condiciones ambientales que en algunos casos provocan alteraciones en la estructura de la cromatina, lo que a su vez puede afectar la expresión génica y originar características fenotípicas distintas. A diferencia de un efecto puramente ambiental, estas características quedan fijadas en la cromatina, de tal manera que pueden llegar a heredarse o permanecer estables después del estímulo, es decir, aun después de un cambio de entorno o de hábitos (Figura 1B).

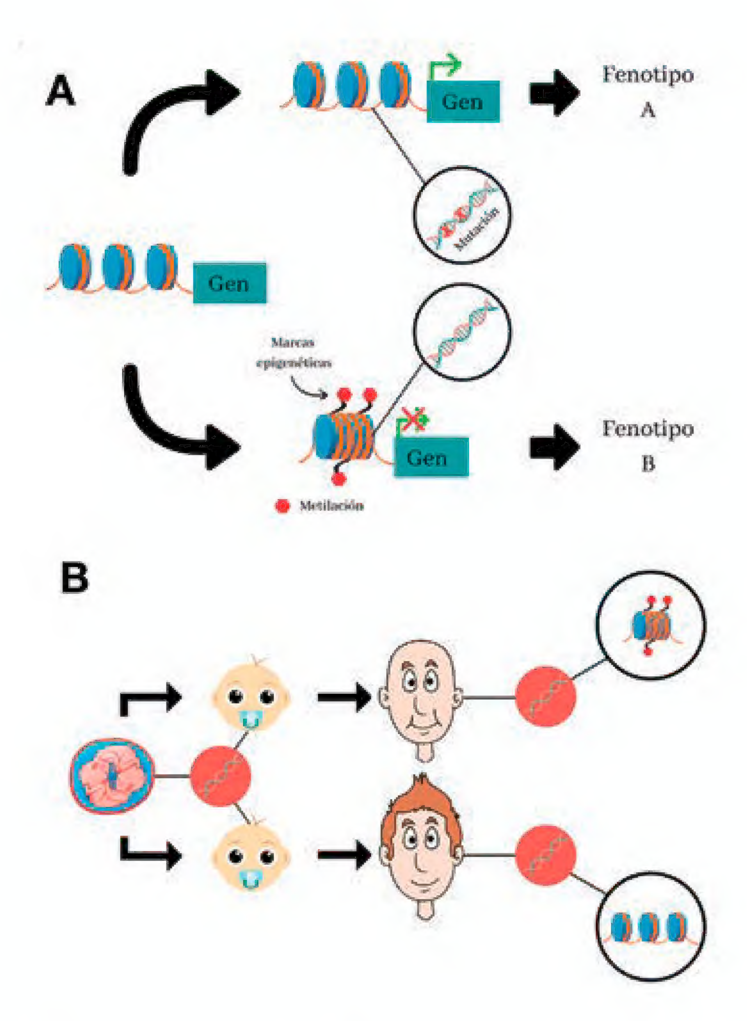


Figura 1. A) Diferencias entre los cambios genéticos y epigenéticos. Los cambios genéticos involucran alteraciones en la secuencia de nucleótidos en el ADN, por otro lado, los cambios epigenéticos involucran modificaciones en la estructura de la cromatina. B) Los gemelos monocigóticos comparten el mismo ADN, sin embargo, al crecer pueden estar expuestos a diferentes condiciones ambientales y sociales que llegan a provocar alteraciones en la estructura de la cromatina que se fijan establemente y que pueden alterar la expresión génica, desencadenando diferencias en su fenotipo. Imagen: elaboración propia.



Mecanismos epigenéticos

La cromatina es el material del que están compuestos los cromosomas, y como se mencionó antes, es la estructura gracias a la cual las hebras de ADN se acomodan o quedan empaquetadas por medio de unas proteínas denominadas histonas y no histonas. El ADN lleva consigo la información genética, mientras que las proteínas tienen la función de empaquetar y organizar el ADN dentro del núcleo celular. A continuación se explican con detalle los mecanismos epigenéticos mejor descritos hasta ahora (la metilación del ADN, las modificaciones de las histonas o modificaciones postraduccionales y la remodelación de la cromatina dependiente de los ARN no codificantes; Figura 2). Todas las modificaciones epigenéticas tienen la característica de ser reversibles, por lo que la estructura de la cromatina es dinámica, lo que implica que en algún momento puede estar más compactada o relajada, dependiendo de la etapa de desarrollo de un organismo o los estímulos ambientales recibidos.

Metilación: adición de un grupo metilo al ADN

Este mecanismo epigenético se refiere a la adición de una molécula denominada metilo (CH_3) a ciertas citosinas (C, una de las cuatro bases que forman el ADN). En mamíferos, la metilación se da exclusivamente en las citosinas que están seguidas de una guanina (G, otra de las bases del ADN), es decir, sucede en contexto CG (citosina-guanina). En cambio, la metilación en plantas se puede dar en las siguientes secuencias: CG, CHG, CHH (donde H puede ser cualquiera de las otras bases: G, adenina (A) o timina (T) (Figura 2). Se sabe que un incremento en la metilación del ADN puede generar una cromatina más compacta, que promueve que no se expresen ciertos genes.

La metilación del ADN requiere proteínas especializadas en adicionar el grupo metilo en las citosinas, las ADN metiltransferasas (ADN MT). Es posible revertir la metilación a través de una serie de reacciones químicas que promueven la oxidación del grupo metilo, o, como en el caso de las plantas, por medio de proteínas especializadas en quitar la citosina metilada para remplazarla por una no metilada usando la maquinaria de reparación del ADN.

Modificaciones de las histonas que regulan la expresión génica

El segundo mecanismo epigenético consiste en la adición de un compuesto químico en algunos de los aminoácidos que conforman las proteínas histonas. Esta modificación se da una vez que la histona se forma, es decir, después de ser traducida, por ello se conocen como modificaciones "postraduccionales". Los compuestos químicos que se adicionan pueden ser metilos (CH_3) y acetilos ($COCH_3$), entre otros (Figura 2B).

Efectivamente, para funcionar las histonas cuentan con una característica o motivo en la región aminoterminal de vital importancia, que contiene residuos de aminoácidos susceptibles de ser modificados (Figura 2B). Las modificaciones en las histonas pueden alterar su estructura o atraer otras proteínas que pueden acabar por modificar la estructura de la cromatina y a su vez la expresión génica. Una cromatina sumamente compacta (condensada) impediría el paso de maquinaria molecular transcripcional, lo que provocaría que un determinado gen no se transcriba y por lo tanto no se exprese. Por el contrario, una cromatina menos compacta o "descondensada" permitiría el paso de maquinaria transcripcional y la expresión de un gen.

Estas modificaciones epigenéticas suceden gracias a las enzimas acetiltransferasas y metiltransferasas, por mencionar algunos ejemplos; esta maquinaria molecular contiene además otras proteínas accesorias que ayudan a estas enzimas a encontrar y unirse a los genes que van a regular, es decir, a sus genes blanco. Muchas de estas enzimas forman complejos de diversas proteínas conocidos como *complejos epigenéticos* (por ejemplo, los complejos TrxG, por las siglas en inglés de *Trithorax Group*, y PcG, por *Polycomb Group*). TrxG se encarga de mantener la cromatina más laxa y transcripcionalmente activa, mientras que PcG la mantiene más compacta y transcripcionalmente inactiva. Estos dos complejos regulan la expresión de muchos genes homeóticos que

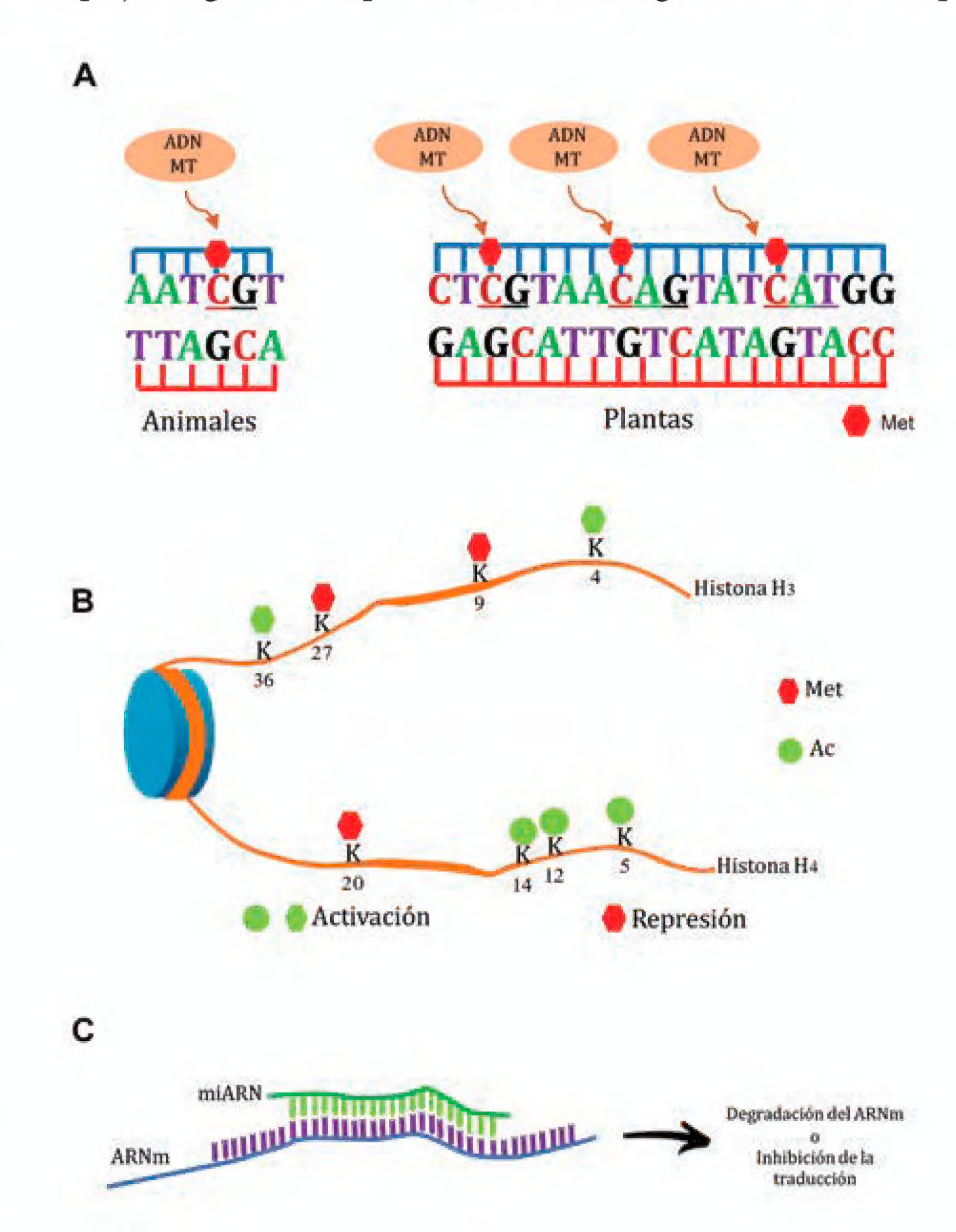


Figura 2. Mecanismos epigenéticos. A) La metilación del ADN o adición de un grupo metilo (Met) en la citosinas (C) se da por la acción de las ADN metiltransferasas (ADN MT). En animales las citosinas que se metilan son aquellas que están adyacentes a una guanina (G), mientras que en plantas la metilación se da en las secuencias CG, CHC y CHH, en donde H puede ser cualquier base (A, T o G). B) Modificaciones de las histonas, las histonas tienen aminoácidos como lisinas (K) que se pueden metilar (Met) o acetilar (Ac) y dependiendo del o los aminoácidos modificados, la cromatina puede permitir la activación transcripcional o su represión. C) Los miARNs son ARNs pequeños que al encontrar un ARN mensajero (ARNm) complementario, se unen y pueden inducir una maquinaria molecular para degradar al ARNm o evitar que este ARN se traduzca en proteína, por lo que es una manera de inhibir la formación de determinadas proteínas. Imagen: elaboración propia.



permiten la formación de los órganos o tejidos de un organismo. Mario Zurita habla ampliamente sobre los genes homeóticos en el artículo *Los genes homeóticos y el desarrollo de la mosca de la fruta* en la *Revista Ciencias* (https://bit.ly/3Teccgz).

La remodelación de la cromatina depende de ARN no codificantes

En el tercer mecanismo epigenético intervienen ARN no codificantes, entre los que se encuentran los micro ARN o ARN pequeños (miARN) y ARN largos no codificantes (lncARN). Los miARN son ARN cortos no codificantes, de entre solo 21 a 24 nucleótidos, que dirigen el silenciamiento o apagado génico postranscripcional. Estos mecanismos juegan un papel crucial en el control de procesos de desarrollo y adaptación al estrés biótico y abiótico. Estos miARN se unen a los ARNm, es decir, a los ARN que dan origen a los genes, para inhibir su traducción o degradarlos y así evitar la formación de una proteína determinada (Figura 2C).

Por otro lado, los lncARN son ARN de mayor longitud (más de 24 nucleótidos) no codificantes. Se ha propuesto que tienen diversas funciones celulares, como regular positiva o negativamente la unión del complejo PcG a la cromatina, contribuyendo así a la regulación de la expresión de los genes blanco de PcG.

El papel de la epigenética en la determinación del sexo

A lo largo del tiempo se han ido descubriendo los mecanismos que regulan la determinación del sexo entre los organismos. En muchos animales, incluyendo al humano, el sexo es definido, desde el momento de la fertilización, por los cromosomas sexuales, pero en algunos peces y reptiles el sexo es determinado por el ambiente, después de la fertilización. En la determinación sexual por ambiente hay un momento, conocido como *periodo termosensible*, en el que la temperatura a la que se incuba el huevo es crucial en la diferenciación de lo que serán ovarios o testículos, es decir, los gametos femeninos y masculinos, respectivamente. A menudo las temperaturas bajas son masculinizantes (es decir, se produce mayor cantidad de machos), y las altas, feminizantes (producen mayor cantidad de hembras).

De este mecanismo de determinación depende, por ejemplo, el sexo de las tortugas marinas *Lepidochelys olivácea*, conocidas como tortugas oliváceas o golfinas, que anidan en las playas del Pacífico mexicano. En este caso la epigenética juega un papel muy importante, ya que la temperatura a la que se incuba el huevo puede provocar cambios en la metilación del ADN y afectar directamente la expresión de los genes involucrados en la definición del sexo de la cría.

Las temperaturas bajas en las tortugas de agua dulce de orejas rojas (*Trachemys scripta*) provocan la eliminación de algunas marcas epigenéticas de represión adicionadas por la acción del complejo PcG, y esto induce la expresión del factor de transcripción Dmrt1 (Figura 3A), encargado de la diferenciación testicular. Por el contrario, cuando las temperaturas son altas, el complejo PcG reprime a Dmrt1 y en consecuencia se induce la formación de órganos femeninos (Figura 3A). Es interesante observar que los mecanismos epigenéticos son distintos en ambas tortugas: mientras que en la golfina la determinación del sexo es por la metilación del ADN, en la tortuga de orejas rojas es por la metilación de las histonas, aunque en ambos casos se producirán hembras cuando las temperaturas son más altas. Estos casos demuestran un vínculo directo entre la temperatura y los mecanismos epigenéticos en la determinación del sexo y resaltan uno de los efectos que pueden provocar las alteraciones climáticas actuales.

Epigenética y diferencias en castas de abejas

Es muy conocido el caso de las abejas europeas (*Apis mellifera*), en cuya colmena existe una separación por castas: hay abejas obreras y una abeja reina, diferenciadas morfológica, fisiológica y conductualmente, a pesar de que el genoma de ambas es idéntico. Una de las causas de esas diferencias radica en el epigenoma, es decir, en las marcas epigenéticas del genoma. Las diferencias epigenéticas provocan las diferencias fisiológicas observadas entre ambas castas: las abejas reina producen alrededor de 2 mil huevos en un día, mientras que las obreras son estériles. Además, las abejas reina son cinco veces más grandes y 20 veces más longevas que las obreras. En este caso el lema "eres lo que comes" sirve para explicar las dramáticas diferencias: a pesar de que inicialmente tanto las larvas de abejas reina como las de obreras se alimentan con una dieta de jalea real, el desarrollo de las segundas cambia pronto al alimentarse con una dieta de néctar y polen, mientras que las abejas reina continúan alimentándose de jalea real hasta la etapa adulta (Figura 3B).

Wen-Feng Chen y colaboradores (https://bit.ly/3QVikIy), en un estudio publicado en 2021 observaron que la jalea real contiene ingredientes que modulan la función de una de las enzimas que metila el ADN en los residuos de citosinas. De hecho, estos autores llevaron a cabo experimentos utilizando una dieta que imita los efectos de la jalea real y añadieron un compuesto químico que inhibe la actividad de las ADN metiltransferasas; observaron que la dieta provocó que la mayoría de las larvas presentara características de abejas reina. En un artículo publicado en la revista *Science* en 2008, Kucharski y colaboradores fueron más allá: para su investigación generaron larvas incapaces de sintetizar una de las ADN metiltransferasas; al eclosionar, las larvas se convirtieron en abejas reina independientemente de la dieta. Además, en otros estudios que comparan la expresión génica de todo el genoma entre abejas reina y obreras identificaron una serie de genes clave cuya expresión es mayor en las primeras, quizá debido a cambios en la metilación del ADN.

La epigenética en las plantas

La primavera está caracterizada por tener temperaturas templadas, pero sin duda lo que más la identifica es ser la estación en que muchas plantas florecen. La floración de algunas plantas, sobre todo herbáceas, depende de inviernos con frío prolongado, fenómeno conocido como *vernalización* (temperaturas menores a 10ºC por más de cuatro semanas). *Arabidopsis thaliana* es una planta modelo usada tradicionalmente en investigación, nativa de Europa y Asia y presente también en el norte de África. Algunas de sus variantes, en particular las del norte de Asia y Europa, requieren de la vernalización para florecer.

La vernalización provoca la represión de un gen conocido técnicamente como FLOWERING LOCUS C (*FLC*), que inhibe la floración, de manera que después de la vernalización, cuando las temperaturas son más cálidas, las plantas ya no expresan a *FLC* y empiezan a florecer. En este caso, la represión de FLC se debe a marcas epigenéticas: las señales ambientales se integran a través de los mecanismos epigenéticos para modular la expresión génica y con ello adaptar la fisiología de las plantas a su entorno.

La regulación de *FLC* se da de la siguiente manera: durante la germinación y el desarrollo de la nueva planta, la expresión de FLC permite que se desarrollen adecuadamente los órganos vegetativos, hasta que la planta llega a la madurez; así, este gen evita que los órganos reproductivos, y por lo tanto las flores, se formen antes de tiempo. Para que se formen las flores se requiere de un periodo de vernalización, en el que el complejo epigenético PcG indica con marcas de represión (por ejemplo, trimetilación de la histona H3 en la lisina 27, formación de lncARN, entre otros) que no se expresará el gen (Figura 3C).

Esta represión de *FLC* se mantiene estable durante la formación de los órganos florales, pero durante la embriogénesis, cuando se empiezan a desarrollar las semillas, la represión de *FLC* tiene que revertirse para que la nueva generación tenga la misma capacidad de desarrollarse y percibir la temperatura para acoplar sus tiempos de reproducción igual que su progenitora. En este caso, el complejo epigenético TrxG juega el papel fundamental de inducir la expresión de *FLC* (Figura 3C). Este mecanismo es importante para que la floración y la producción de semillas sucedan en el tiempo adecuado, es decir, cuando las condiciones son favorables para asegurar la descendencia.

Los complejos epigenéticos TrxG y PcG no solo se centran en regular la floración sino que también regulan otros procesos del desarrollo de las plantas. En nuestro grupo de investigación estamos realizando estudios sobre la función que tienen esos factores epigenéticos en los procesos de diferenciación de las células troncales de las plantas. Las células troncales son células no diferenciadas o pluripotentes, es decir, son capaces de diferenciarse en

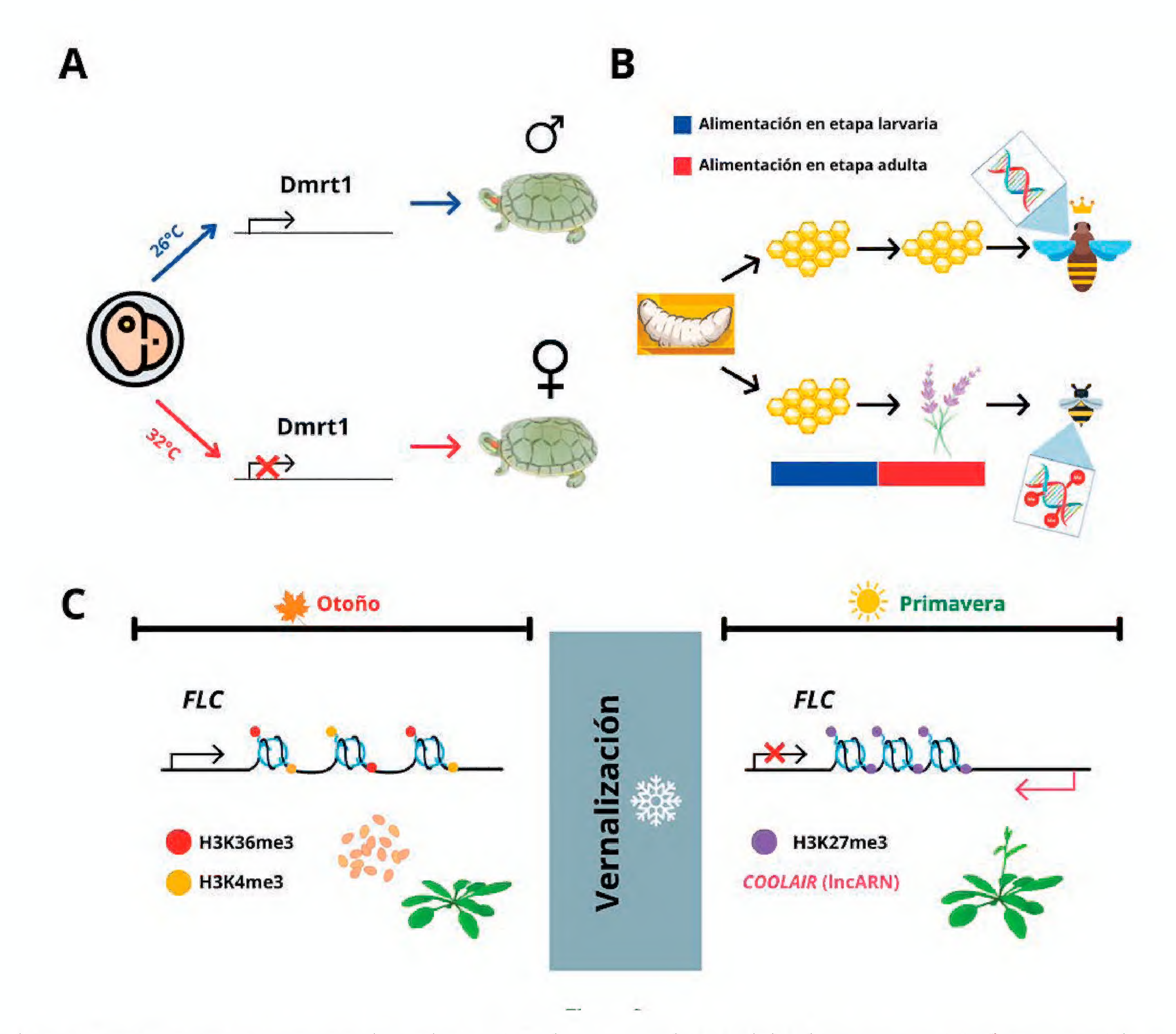


Figura 3. Ejemplos de mecanismos epigenéticos en animales y plantas A) En las tortugas de agua dulce de orejas rojas (*Trachemys scripta*) las temperaturas altas (32°C) generan una mayor cantidad de hembras debido a que el complejo PcG pone marcas de represión en el factor de transcripción Dmrt1, mientras que a temperaturas bajas (26°C), este complejo no coloca las marcas y por tanto se da la diferenciación testicular gracias a la expresión de Dmrt1. B) En las abejas europeas (*Apis mellifera*), la diferencia de castas es provocada por distintos hábitos alimenticios en la etapa adulta, la dieta basada en jalea real promueve una baja metilación del ADN de algunos genes que impacta directamente en su expresión, generando las características de una abeja reina en la etapa adulta. Por otro lado, la dieta basada en néctar y polen provoca un incremento en la metilación de ADN, reprimiendo los genes implicados en dar características de abejas reina, generando así abejas obreras. C) En algunas variantes naturales de *Arabidopsis thaliana*, la floración se da después de un periodo prolongado de frío llamado vernalización. Este proceso está controlado por la regulación de la expresión de FLC, gen que inhibe la floración. Durante el otoño, la expresión de FLC inducida por las marcas epigenéticas de activación (H3K36me3 y H3K4me3) permite el desarrollo vegetativo de la planta; durante el periodo de vernalización las marcas de represión (H3K27me3 y LncARN como COOLAIR) silencian a FLC para que durante la primavera la planta pueda producir sus flores. Imgaen: elaboración propia.



distintos tipos de células especializadas y originar los diferentes tejidos que forman una planta. En ese proceso de diferenciación, los factores epigenéticos juegan un papel fundamental para apagar el programa genético de una célula pluripotente y encender el programa genético de una célula diferenciada.

También estamos estudiando la función que tienen los factores epigenéticos en las respuestas a algunos tipos de estrés (como la deficiencia de agua o estrés hídrico). Algunas marcas epigenéticas pueden ayudar a generar una especie de memoria en las plantas que han pasado por un primer estrés, de manera que cuando enfrentan otro del mismo tipo, responden más rápido para sobrellevarlo. Podría esperarse que las plantas que ya cuentan con una memoria epigenética padecerían menos el estrés hídrico que las que no tienen ese tipo de memoria.

Conclusión

Como se mencionó en los diferentes ejemplos que damos en este artículo, la epigenética y sus mecanismos, que ocurren de manera natural, son fundamentales en diversos procesos para la supervivencia de los seres vivos. Gracias a los mecanismos epigenéticos los organismos pueden tener plasticidad fenotípica, lo que significa que pueden regular funciones de la vida diaria y contar con mecanismos que les ayudan a adaptarse a condiciones ambientales desfavorables. En este sentido, es posible que un organismo desarrolle variaciones fenotípicas heredables debido a cambios epigenéticos. El estudio de la epigenética ayuda a comprender mejor los mecanismos que subyacen a la variación natural y plasticidad sobre algunos rasgos ecológicamente importantes, como los tiempos de floración en las plantas, la determinación del sexo o incluso los rasgos conductuales en algunos animales.

Estudiar más procesos desde el punto de vista epigenético podría además aportar datos interesantes sobre la evolución de los organismos, ya que los procesos epigenéticos pueden generar *epimutaciones* (modificaciones originadas por mecanismos epigenéticos que se fijan y heredan en una población). Las *epimutaciones* surgen como respuesta a rasgos adaptativos, por lo que pueden ocurrir en varios individuos a la vez y tener así un impacto importante en la evolución de las especies.

Los efectos epigenéticos en ecología y evolución constituyen un área prometedora para entender mejor cómo los organismos se enfrentan a diferentes cambios ambientales (por ejemplo, los climáticos) y qué consecuencias evolutivas pueden tener estos sobre los organismos.

Atzhiry D. Vigueras-Enciso es estudiante de la carrera de Biología en la Facultad de Ciencias de la UNAM con gran interés en temas de genética molecular y epigenética de plantas. Le apasiona practicar Danza Folklórica Mexicana en sus ratos libres.

César E. Pacheco-Morales es estudiante de la carrera de Biología en la Facultad de Ciencias de la UNAM con el propósito de especializarse en proyectos de genética molecular y epigenética de animales y plantas. Le gusta el deporte y es cinta negra en karate.

María de la Paz Sánchez es investigadora del Laboratorio de Genética Molecular, Epigenética, Desarrollo y Evolución de plantas del Instituto de Ecologia de la UNAM. Le interesa la biología molecular y epigenética de plantas. Su reto es promover la ciencia en México.

Para saber más

• Flores-Sánchez J., E. Petrone-Mendoza, S. Steckenborn, A. Garay-Arroyo, B. García Ponce de León, E. Álvarez-Buylla y M. P. Sánchez. (2013). El control epigenético en el desarrollo de las plantas a través de PcG y TrxG. *Mensaje Bioquímico* Vol. XXXVII: 109-126.

• Ge, C., J. Ye, C. Weber, W. Sun, H. Zhang, Y. Zhou, C. Cai, G. Qian y B. Capel. (2018). The histone demethylase KDM6B regulates temperature-dependent sex determination in a turtle species. *Science* 360: 645-648. DOI: 10.1126/science.aap8328

• Kucharski, R., J. Maleszka, S. Foret y R. Maleszka. (2008). Nutritional control of reproductive status in honeybees via DNA methylation. *Science* 319: 1827-1830. DOI: 10.1126/science.1153069

• Sánchez, M. P., P. Aceves-García, E. Petrone, S. Steckenborn, R. Vega-Leon, E. R. Álvarez-Buylla, A. Garay-Arroyo y B. García-Ponce. (2015). The impact of Polycomb group (PcG) and Trithorax group (TrxG) epigenetic factors in plant plasticity. *New Phytol* 208: 684-694. DOI: 10.1111/nph.13486

Las dioscóreas, la ecología y la industria en México (1942-1959)

Rosa Jimena Rey Loaiza

A 25 años de la fundación del Instituto de Ecología, las siguientes líneas recuerdan al lector el contexto en que surgieron las primeras investigaciones ecológicas en México y la importancia de éstas cuando se analiza el vínculo existente entre el conocimiento científico y las políticas públicas para fomentar el desarrollo económico. El caso que aquí se comenta es el de la familia botánica de las dioscóreas, un grupo de plantas herbáceas, muchas de ellas trepadoras, de zonas tropicales del mundo. La explotación de éstas constituyó la base para importantes procesos industriales, científicos y sociales durante casi todo el periodo conocido como el Milagro Mexicano (1940-1982) y el nacimiento de la ecología, en 1959. Veamos de cerca algunos detalles.

Dioscóreas y hormonas esteroides (1939-1945)

La historia de la ecología en México está íntimamente ligada a la de la familia botánica Dioscoreaceae, cuyas plantas crecían de manera espontánea y abundante en "las regiones cálido-húmedas de la vertiente mexicana del Golfo de México" (Xolocotzi, 1985: 301), pues revolucionaron en 1942 la producción de hormonas esteroides, al convertirse en una alternativa más barata y eficiente que la materia de origen animal —toneladas de ovarios de cerda, testículos de toro, orina de caballo— usada hasta entonces por la industria farmacéutica europea.

En 1938, el químico Russell Marker obtuvo progesterona en un laboratorio del State College de Pennsylvania a partir de diosgenina extraída del rizoma de *Dioscorea mexicana*. Interesado además en la producción masiva de hormonas esteroides, Marker se propuso encontrar materia prima abundante y de buena calidad; por ello viajó de Canadá a México a buscar las plantas. Las encontró en 1942 entre Orizaba y Fortín de las Flores (Veracruz) con la ayuda de Alberto Moreno, el dueño de una tienda rural que lo llevó hasta donde estaban aquellas plantas "de raíces gigantes" (técnicamente, un rizoma gigante, Soto Laveaga, 2009: 40).

Junto con Emeric Somlo y Federico Lehman, Marker creó en 1944 los laboratorios Syntex en la Ciudad de México. Al año siguiente, Syntex colocó en el mercado un considerable porcentaje de la producción mundial de progesterona y con ello redujo en un 77.5% su costo (de US$ 80 por gramo a 18, Gereffi, 1986: 85); pero en 1945 rompió la sociedad con Somlo y Lehman y se fue de Syntex con su proceso para sintetizar progesterona.



Russell Marker junto a familiares de Alberto Moreno en la tienda *¡Aquí me quedo!* (1990). Fotografía de Ezra Stoller, tomada de Gabriela Soto Laveaga, *Jungle laboratories: Mexican peasants, national projects, and the making of the Pill* (2009, Duke University Press), p. 59.

La industria farmacéutica nacional (1944-1963)

El trabajo de Marker en Pennsylvania y México desplazó el control de la industria farmacéutica de hormonas esteroides del oligopolio europeo al monopolio mexicano y cambió el punto clave de la industria de la tecnología a la materia prima. En poco más de una década (1944-1956), el dominio de la producción pasó de manos alemanas a mexicanas y luego al de las compañías trasnacionales estadounidenses (Gereffi, 1986: 80).

El país vivió de 1940 a 1982 un largo proceso de crecimiento económico conocido como el Milagro Mexicano, caracterizado por la intervención del Estado en la economía y la creación de un sistema de aranceles a la importación, leyes, reglamentos, permisos gubernamentales e incentivos fiscales que protegían a las empresas nacionales de la competencia extranjera. Debido a esto, Syntex tuvo una relación especial con el Estado mexicano y recibió su protección hasta 1955. Se han comentado algunos resultados destacados de esa asociación, pero no se ha mencionado el más importante de todos: en sus laboratorios el químico Luis Ernesto Miramontes, de la UNAM, y con sólo 26 años, aisló la noretisterona (1951 Ver: *El mexicano que detonó la revolución sexual* en http://www.cienciamx.com/), el primer paso para el desarrollo de la píldora anticonceptiva.





El rizoma gigante de *Dioscorea mexicana*. Fotografía de Ezra Stoller, tomada de Gabriela Soto Laveaga, *Jungle laboratories: Mexican peasants, national projects, and the making of the Pill* (2009, Duke University Press), p. 80.

En ese periodo, el Estado también creó empresas para la fabricación de medicamentos, como la Industria Nacional Químico-Farmacéutica (1949-1964), constituida a partir de compañías extranjeras confiscadas durante la Segunda Guerra Mundial. La rama más importante de la Industria eran los laboratorios Farquinal (1950-1962); en ellos Arturo Gómez Pompa obtuvo su primer trabajo como botánico para estudiar *Dioscorea*, bajo la dirección de Francisco Giral González, español, fitoquímico farmacéutico, amigo de Faustino Miranda y entonces el más versado en la química de las plantas mexicanas.

A partir de 1955, el Estado mexicano retiró a Syntex el trato preferencial que había recibido frente a sus competidores locales y extranjeros, a consecuencia de las presiones antimonopolio estadounidenses. En ese año había seis compañías mexicanas, después entraron al mercado nueve subsidiarias de compañías extranjeras; en 1956 Emeric Somlo vendió Syntex a Ogden Corporation, y para 1963 ya no existía ninguna de las seis empresas mexicanas (Gereffi, 1986: 97, 111).

Para Gary Gereffi, sociólogo y estudioso de la industria farmacéutica mexicana de hormonas esteroides, un país del tercer mundo tiene pocas probabilidades de éxito en su búsqueda de un desarrollo autónomo e integrado en una industria dominada por compañías trasnacionales, incluso en condiciones ideales (Gereffi, 1986: 80).

La Comisión de Estudios sobre la Ecología de las Dioscóreas (1959)

La demanda mundial de hormonas esteroides venía creciendo desde la década de 1930; éstas eran usadas para un espectro amplio de trastornos como el cáncer de próstata, la arteroesclerosis, los síntomas menopáusicos y menstruales y los abortos espontáneos, entre otras aplicaciones. En 1949, la demanda explotó cuando se supo que la cortisona aliviaba el dolor provocado por la artritis reumatoide. Para entonces el único productor de cortisona era Merck & Company, y la única materia prima, la bilis de buey. La Upjohn Company encontró en 1951 la forma de hacer cortisona a partir de progesterona, y con ello abrió la puerta al uso de esteroides mexicanos elaborados a partir de diosgenina como materiales intermedios (Gereffi, 1986: 88). En la década de 1960, la demanda de estos compuestos aumentaría todavía más con la producción de píldoras anticonceptivas.

En 1949 se descubrió que *Dioscorea composita*, el barbasco, era mejor para la producción de hormonas esteroides que *D. mexicana*, por poseer un ciclo biológico más corto (sólo tres años, frente a los 20 de *D. mexicana*), tener casi cinco veces más diosgenina y ser prácticamente inagotable (Hinke, 2008: 56; Gereffi, 1986: 86). Por esta razón, el barbasco se convirtió en la materia prima favorita para la industria y en un bien de gran valor para el Estado mexicano.

Ante el desconocimiento de la distribución y la abundancia de estas plantas, la Subsecretaría Forestal y de la Fauna del gobierno de Adolfo López Mateos, encabezada por Enrique Beltrán Castillo, ideó en 1959 un mecanismo para regular su extracción y asegurar el mantenimiento de la producción natural: un acuerdo con la industria farmacéutica, para que, a cambio del barbasco recibido, respaldara con dinero el estudio de la ecología de las dioscóreas mexicanas en el recién creado Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y se pudiera crear la Comisión de Estudios sobre la Ecología de Dioscóreas, con la cual se inició la investigación ecológica en el país.



Ejemplar de herbario de *Dioscorea composita*. Digitalizado por el Jardín Botánico de Nueva York.



Ilustración de *Dioscorea mexicana* en la obra *Horticulteur belge, journal des jardiniers et amateurs*. Bruselas 1833-1838. p. 101. Disponible digitalizada por el Jardín Botánico de Nueva York para la *Biodiversity Heritage Library* (BHL) OCLC: 2447434. https://www.biodiversitylibrary.org/

Faustino Miranda, Efraím Hernández Xolocotzi y Arturo Gómez Pompa dirigieron la Comisión en sus inicios, y en torno a ellos se sumaron estudiantes de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, la Escuela Nacional de Agricultura de Chapingo y la Facultad de Ciencias de la UNAM. De las investigaciones realizadas por la Comisión se desprendieron trabajos de titulación de destacadas figuras académicas ligadas al origen del Instituto de Ecología, como el *Estudio de la sucesión en un área talada en Tuxtepec, Oax.* (tesis de licenciatura, 1964), del doctor José Sarukhán, o *Diversidad de especies en las selvas altas de la planicie costera del golfo de México* (tesis de licenciatura, 1969), del doctor Víctor Toledo.

Los barbasqueros

En los años setenta, como resultado de la importancia económica adquirida por el barbasco, surgió una identidad colectiva, los barbasqueros, campesinos de escasos recursos que encontraron en la recolección de esas plantas una forma de mejorar la economía familiar, y durante el gobierno de Luis Echeverría (1970-1976) comenzaron a definirse no como recolectores, sino como propietarios del barbasco y a reclamar la redistribución de las ganancias en el sector. Hacia 1976, 25 mil campesinos organizados solicitaron a Echeverría la nacionalización de la industria farmacéutica (Soto, 2009: 171).

Conclusiones

La actividad científica desatada en nuestro país a partir de la explotación de las dioscóreas es notable. México se convirtió por diez años en centro mundial de investigación original en química de esteroides. En el área de la biología, la Comisión abrió para su estudio el campo de la investigación ecológica y se encargó de la preparación de los primeros profesionales de la disciplina.

Faustino Miranda, Efraím Hernández X., desde la Sociedad Botánica de México, y Enrique Beltrán Castillo, biólogo y Subsecretario Forestal y de la Fauna (1958-1964), "quien entendió bien el reto y la oportunidad que representaba el otorgamiento de permisos para explotar los recursos silvestres mexicanos" (Gómez Pompa, sitio oficial), ejecutaron la idea de sustentar en la ciencia la toma de decisiones del gobierno. De esta manera, la articulación entre academia y Estado aparece fuerte y clara en los inicios de la ecología en nuestro país. A tan sólo 62 años de la creación de la Comisión, celebramos la vertiente que dio origen al Instituto de Ecología, UNAM.

Rosa Jimena Rey Loaiza es responsable de la biblioteca del Instituto de Evología desde 2017. Cursó Estudios Latinoamericanos en la UNAM y tiene amplia experiencia en el ámbito editorial. Su responsabilidad en el Instituto va desde ampliar la oferta de revistas, libros y bases de datos sobre ecología en los catálogos de la UNAM, hasta buscar y adquirir los libros y artículos que lleguen a solicitar los miembros de la comunidad.

Para saber más

- Cárdenas, E. (2010). La economía mexicana en el dilatado siglo XX, 1929-2009. En *Historia económica general de México: de la colonia a nuestros días*. El Colegio de México, pp. 503-548. https://bit.ly/3QRP3ic
- Gereffi, G. (1986). *Industria farmacéutica y dependencia en el tercer mundo*. Antonio Garst (trad.). México: Fondo de Cultura Económica.
- Gómez Pompa, A. Sitio *web* https://www.reservaeleden.mx/dr-gómez-pompa. Última consulta: 22 de noviembre de 2017.
- Hernández Xolocotzi, E. (1972, 1985). Xolocotzia. I. Texcoco: Universidad Autónoma de Chapingo (Revista de Geografía Agrícola), pp. 273-278; 301-306; 307-310.
- Hinke, N. (2008). El barbasco. *Ciencias* 89: 54-57. https://bit.ly/3Af9RsR
- Loyden, E. (2015). *Las voces de la biodiversidad en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Piñero, D. y J. Sarukhán. (2011). Deriva génica, selección natural, coalescencia y restricciones evolutivas en el Instituto de Ecología. *Ciencias* 103: 70-77. https://bit.ly/3APifAQ
- Soto Laveaga, G. (2009). *Jungle laboratories: Mexican peasants, national projects, and the making of the Pill*. Durham: Duke University Press. https://bit.ly/3rvknIB



Los gigantes centenarios del desierto de Sonora y Arizona

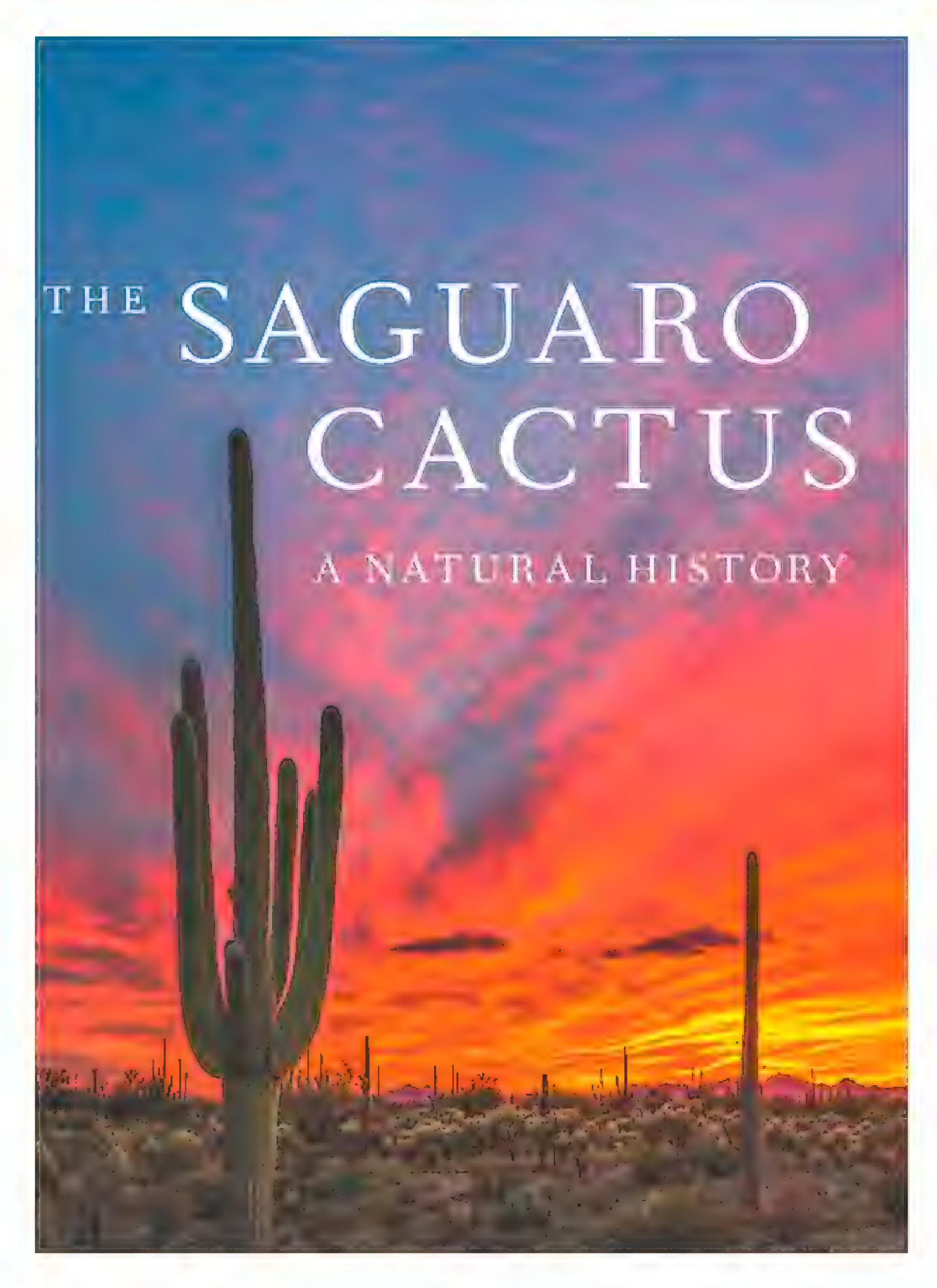
Luis E. Eguiarte y Clementina Equihua Zamora

Yetman David, Alberto Búrquez, Kevin Hultine y Michael Sanderson, con Frank S. Crosswhite. (2020). *The Saguraro Cactus. A Natural History*. The University of Arizona Press. Tucson. USA. ISBN-13:978-0-8165-4004-4. 191 páginas. Disponible en la biblioteca de la UNAM: https://bit.ly/ 3AgRDZs

No cabe duda de que entre las múltiples familias de plantas que existen, la de los cactus es una de las más atractivas. Todos los miembros de esta familia son raros y fascinantes, son muy diversos en formas y hay muchas especies, se estima que existen entre 1,400 y 1,850, dependiendo de los autores, repartidas en unos 125 géneros. Es un grupo de plantas básicamente americano, con una sola especie (o tres, según el autor) que parece haber llegado de forma natural a África y Sri Lanka. México es un país especialmente rico en especies de esta familia, ya que encontramos unas 900, que disminuyen en número latitudinalmente a solo cuatro en Canadá.

De toda la familia, tal vez los más intrigantes son los cactus gigantes, a los cuales llamamos cactáceas columnares. Hay unas 100 especies de cactus columnares en el mundo, y el lugar con más especies es el valle de Tehuacán, en donde viven 18, seguido por la cuenca del Balsas y el cañón del río Marañón en Perú. En el desierto sonorense, además del sahuaro (*Carnegiea gigantea*) hay otras seis especies de cactus columnares relativamente comunes (dependiendo de la localidad) y otras dos que solo son abundantes en la porción sur del desierto. En una pequeña área alrededor de Guaymas el sahuaro coexiste con otras seis especies de cactáceas columnares. Y ya en Arizona, además del sahuaro, solo se encuentra otra cactácea columnar, el pitayo dulce (*Stenocereus thurberi*).

El sahuaro es indudablemente la especie icónica del estado de Arizona (EE.UU) y una de las más emblemáticas de Sonora, aquí en México. El sahuaro vive prácticamente solo en esos dos estados, ya que su distribución apenas toca dos pequeñas áreas del estado de California (EE.UU), pero en Arizona y Sonora se distribuye ampliamente y es muy común. Efectivamente, los sahuaros son plantas impresionantes en el desierto, donde usualmente son los organismos más altos: llegan a medir 23 metros de altura y viven hasta 200 años. Los sahuaros acumulan mucha agua —de su biomasa, más de 90% es agua—, lo que les permite crecer y reproducirse en el desierto. Un sahuaro de unos 3 metros sin ramificarse tiene en sus tejidos unos 170 litros, mientras que otro grande de 10 metros con muchos brazos acumularía unos 3,500. Sobre su longevidad, una planta de un metro de alto tendría aproximadamente 25 años, mientras que una de 10 metros llegaría a los 100, así que las plantas centenarias pueden ser relativamente comunes.



Los eventos más importantes en la larga vida de los sahuaros son la reproducción y la germinación de las semillas. Su floración es espectacular debido al gran tamaño de sus flores, que son visitadas por muchos polinizadores, en particular el murciélago magueyero menor, *Leptonycteris yerbabuenae*. Los frutos dulces y la pulpa roja atraen a gran cantidad de aves y murciélagos que pueden ser dispersores o solo depredadores. Los dispersores (como también es el caso de *L. yerbabuenae*) riegan las semillas por el desierto, muchas veces con el beneficio agregado de alentar su germinación cuando pasan por el tracto digestivo. Por el contrario, los depredadores de semillas las destruyen en sus sistemas

digestivos, como sucede con las palomas. Además, los frutos del sahuaro han sido apreciados a lo largo del tiempo por los grupos humanos de la región, en especial los Tohono O´odham (antes conocidos como pápagos), quienes los colectan y preservan junto con las semillas porque son objetos centrales en sus ceremonias para atraer la lluvia y principalmente como alimento de sobrevivencia en las épocas de escasez de comida.

Aunque los sahuaros producen muchas semillas (alrededor de 40 millones durante toda su vida), en las primeras etapas las plántulas necesitan para sobrevivir de las llamadas "plantas nodrizas", árboles —muchas veces leguminosas— que les dan sombra y mejores condiciones para vivir, como mayor humedad y protección contra el pisoteo de animales. De todas maneras, en pocos lugares y momentos existen las condiciones ambientales de temperatura y humedad necesarias para la germinación y sobrevivencia de las plántulas. Se ha estimado que esas condiciones solo se presentan en 10 o menos ocasiones por siglo, de lo que resulta que no encontremos plantas de todos los tamaños cuando caminamos por el desierto; más bien, lo que usualmente vemos son grupos de plantas de tamaños similares porque todas esas plantas son de la misma edad.

Los sahuaros son tan carismáticos y fáciles de estudiar que se han convertido en una de las plantas silvestres mejor conocidas en la actualidad. David Yeatman y colaboradores (2020) nos presentan de manera clara y amena los principales aspectos de su historia natural y su biología, incluyendo información sobre su anatomía y fisiología, ecología, genética, evolución y etnobotánica. El equipo de investigadores que escribió esta obra es realmente notable y representa a un grupo extraordinario de naturalistas modernos que, equipados con herramientas, técnicas y conceptos de frontera, están estudiando esta fascinante especie y otras cactáceas columnares del desierto sonorense.

Esta obra colectiva nos relata diferentes aspectos no solo de la historia natural de los sahuaros, sino de toda la familia de los cactus, de la vegetación y el clima del desierto sonorense, y diferentes temas de investigación realizada con métodos modernos, en particular sobre la fisiología y la genómica de estas plantas. En el primer capítulo se describen la biología, algunas anécdotas relacionadas con su gran tamaño —comparado con el de otros cactus columnares— y cómo los humanos fueron descubriendo, utilizando y estudiando estas plantas majestuosas. Los autores nos platican cómo los primeros naturalistas norteamericanos arribaron a la región, hasta llegar a un evento central en la historia de los estudios sahuareros: la incorporación al *Desert Laboratory* (https://tumamoc.arizona.edu/) en Tucson en 1908 de Forrest Shreve, quien publicó sus estudios sobre el sahuaro y el desierto desde 1910 hasta su muerte en 1950.

El siguiente capítulo describe con más detalle la familia de los cactus. Aquí conoceremos el momento de su origen evolutivo y su posterior diversificación, su distribución y sus fascinantes y singulares características y adaptaciones, como las espinas, su fotosíntesis y ciertos detalles de sus flores y frutos. También se incluyen otras cactáceas columnares, especialmente las del desierto sonorense, y se relata el origen del nombre científico del sahuaro, propuesto para honrar al millonario Andrew Carnegie, quien había apoyado financieramente la creación del *Desert Laboratory* de Tucson.

La ecología de la especie se narra de manera fascinante y amena en otro capítulo, en el que se describen al mismo tiempo la vegetación de Sonora y Arizona, sus climas y las condiciones ambientales donde crecen el sahuaro y otras especies vegetales con las que coexiste. Se relatan los cambios climáticos ocurridos en el pasado, cómo estos han afectado la distribución de la especie y cómo, según las condiciones climáticas de cada año, pueden cambiar los tiempos y el nivel de floración y fructificación. Aquí también se presenta la ecología poblacional, incluyendo los patrones reproductivos, la polinización, la dispersión y la sobrevivencia de plántulas y juveniles. Se discute un modelo conocido técnicamente como *trade-off*, trueque o compensación fisiológica, cuya idea central es que los recursos con los que cuenta un organismo (agua, energía o nutrientes) son limitados y se pueden invertir en tres funciones principales: crecimiento, reproducción o mantenimiento (en estar sanos y fuertes). Si gastas recursos en crecer, ya nos los puedes gastar en reproducirte o en mantenimiento. Los autores presentan de manera gráfica cómo cambia el crecimiento y la reproducción del sahuaro en función del tamaño de la planta: las plantas empiezan a reproducirse cuando alcanzan unos dos metros de altura y a partir de ese momento crecen más lentamente porque gastan cada vez más energía en reproducirse.

El capítulo tres concluye con una breve reseña de los problemas actuales para la conservación del sahuaro, particularmente en México, donde sus poblaciones a pesar de tratarse de una especie protegida y abundante en una de las ANP más importantes del país (inscrita además en la lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO https://whc.unesco.org/en/list/1410/), sufren daños por diferentes procesos antropogénicos, en especial el sobrepastoreo y el efecto de dos pastos invasores en la zona.

En el capítulo cuatro se expone otro grupo de adaptaciones del sahuaro —compartidas con las demás cactáceas—: sus características anatómicas y fisiológicas. Aquí nos enteramos de la gran cantidad de agua que almacenan en sus tallos, la cutícula cerosa que los protege de la desecación y el sobrecalentamiento, y de sus eficientes raíces efímeras. Estas raíces pueden formarse tan solo ocho horas después de una lluvia y gracias a ellas los sahuaros capturan eficientemente el agua de la parte superficial del suelo del desierto. Todo el sistema de raíces, junto con el complejo sistema vascular, almacena y administra eficientemente el agua de extremo a extremo de la planta. Otro aspecto bien conocido y fascinante de la fisiología de las cactáceas es su capacidad para capturar CO_2. Los sahuaros, y otras cactáceas columnares tienen poca superficie de área (no tienen hojas y tienen pocas ramas) y son de gran volumen comparados con la mayoría de las plantas. El que un cactus columnar tenga relativamente poca área significa que también es poca la superficie por la que ésta se evapora, y un gran volumen implica que hay espacio para almacenarla. Gracias a estas cualidades, los cactus columnares pueden vivir en lugares



más secos que otras especies de la familia con volúmenes menores. El lento crecimiento de muchos cactus columnares (otro *trade-off*) también les ayuda a vivir en condiciones extremas. El libro discute el metabolismo CAM (del inglés *crassulacean acid metabolism*), en el que los estomas de las plantas solo se abren de noche, de modo que la pérdida de agua se reduce gracias a una serie de adaptaciones fotosintéticas moleculares que protegen a las plantas de la desecación en las duras condiciones impuestas por el desierto.

Un capítulo técnico notable por su relevancia científica actual es el quinto, donde, utilizando el genoma, se describen diversos aspectos de la genética y evolución de las cactáceas. El genoma del sahuaro fue descrito y publicado en 2017 por dos de los autores del libro junto con otros colaboradores (Copeti *et al.* https://bit.ly/3cjK3DV). Es un genoma de tamaño moderado, de unos 1.4 mil millones de pares de bases de ADN (como la mitad del genoma humano), incluyendo genes para un poco más de 28 mil proteínas diferentes, cuyo código representaría apenas 14% del genoma de la especie. El 58% del genoma está representado por los elementos repetitivos móviles, los transposones, descritos inicialmente en el maíz por la Dra. Barbara McClintock en la década de 1940. Como sucede en todas las plantas con flores, muchos genes están duplicados (hay más de dos copias en el genoma). Con este y otros genomas que obtuvo el mismo equipo de trabajo para diferentes cactáceas se reconstruyó el árbol filogenético de algunas de las cactáceas columnares de Sonora y se calibraron relojes moleculares que sugieren que el grupo de las cactáceas columnares de Norteamérica surgió hace unos 9 millones de años. Curiosamente, se encontró que diferentes genes apoyan distintas relaciones genealógicas, patrón que puede deberse a polimorfismos ancestrales. Cuando hay estos polimorfismos ancestrales, un linaje hereda una de las formas de los genes y otros linajes adquieren otras de las formas ancestrales, pero cada gen se hereda de manera independiente; así, visto desde la perspectiva evolutiva, cada gen puede contar historias de relaciones genealógicas distintas. El flujo genético entre especies también puede explicar las aparentes relaciones genealógicas distintas, lo que significa que grupos diferentes pueden tener genes parecidos por hibridización y no por su genealogía evolutiva.

En el mismo capítulo cinco se analizan otros aspectos de la filogenia y taxonomía del sahuaro, ya que los datos moleculares indican que pertenece al grupo de cactus columnares del género *Pachycereus*. En particular se discute el debate taxonómico para entender por qué el género del sahuaro *Carnegia* solo tiene una especie (*gigantea*), mientras que para el género *Pachycereus* se reconocen de 7 a 10. Los autores explican que, dado que *Carnegia* se propuso taxonómicamente primero, desaparecería el nombre "*Pachycereus*" y todas sus especies pasarían a ser del mismo género, *Carnengia*. En nuestra opinión, se necesitan más estudios al respecto.

Este capítulo concluye con un análisis de genómica de poblaciones realizado en 20 individuos, de ocho poblaciones, a lo largo de su distribución. En términos generales, los autores encuentran que por cada 400 sitios de ADN en su genoma sin variación (todos los individuos tienen exactamente el mismo tipo de bases en esos sitios), un solo sitio es polimórfico (en algunos genomas de individuos de la especie hay una base, digamos A, en otros otra, que podría ser C). Estos niveles de variación genética son bajos para plantas, aunque similares a los reportados en algunos árboles y en humanos. Si se toma en cuenta el tamaño total del genoma, al final hay millones de sitios polimórficos en todo el genoma de la especie. También encontraron que las poblaciones en el sur de Sonora son claramente diferentes genéticamente de las demás, tal vez debido a que dichas poblaciones se han aislado por cambios del clima en el pasado.



Mujeres de la etnia maricopa recolectando frutos de sahuaro. Fotografía: Edward S. Curtis, 1907. División de Impresiones de la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos. Identificación digital cph.3c06799. Wikimedia Commons.

Como indicamos en párrafos anteriores, por mucho tiempo los sahuaros han sido muy importantes para las poblaciones humanas del desierto de Sonora y Arizona. El último capítulo es un bonito estudio entobotánico, ahora ya un clásico, publicado originalmente en 1980 por Dr. Frank S. Crosswhite (quien falleció en el 2008) en la revista *Desert Plants* (https://bit.ly/3cayOhn). En este capítulo se describen con cuidado los rituales y métodos usados por los miembros del grupo Tohono O´odham para la recolecta y procesamiento de los fru-

tos del sahuaro, las diferentes ceremonias relacionadas con las lluvias y su calendario anual de actividades. El capítulo incluye las excelentes fotos originales en blanco y negro de Helga Teiwes, provenientes de la edición original.

El libro no solo es una extraordinaria introducción al estudio de una especie icónica de México y de los desiertos, sino que además es una excelente iniciación a las cactáceas. Sin que lo imagine uno al abrir el libro, también es una singular entrada a la biología moderna porque se abordan tanto aspectos de ecofisiología como de ecología de poblaciones, genómica y evolución. Debemos mencionar que está muy bien escrito, con todo tipo de datos e información interesante, y se encuentra muy bien ilustrado con mapas, fotos de plantas en el campo, ilustraciones científicas o históricas y gráficas. En particular, la impresión del texto y la de las fotos y figuras es excelente, aunque nos hubiera gustado encontrar aún más fotos, como algunas de murciélagos *Leptonycteris* visitando las flores, o de las flores de las otras especies de cactus columnares de la región mencionadas en el texto. También sería interesante incluir mapas de las distribuciones actuales de cada una de las otras especies que tanto se mencionan en el texto.

Es claro que urge publicar el libro en español, a un precio accesible, y asegurar que cuente con una buena distribución. Creemos que en una futura edición convendría incluir análisis de la distribución potencial del sahuaro en el pasado, junto con mejores y más finos análisis de su genética de poblaciones y filogeografía. Toda esta información ayudaría al lector a visualizar mejor la evolución de la especie, sus tamaños efectivos, sus procesos de expansión y contracción demográfica y sus patrones de flujo génico. Además, estamos seguros de que ya se cuenta con buenos datos morfométricos para las diferentes poblaciones del sahuaro en toda su distribución, así que sería fascinante ver esos patrones en mapas y ligarlos con los datos climáticos y ambientales (como suelo y elevación) y con la filogeografía y la genómica de poblaciones de la especie.

Luis E. Eguiarte es investigador del Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental del Departamento de Ecología Evolutiva, Instituto de Ecología, UNAM. Estudia la ecología y evolución de las plantas, bacterias y animales de México, usando marcadores genéticos. Es editor de *Oikos=*.

Clementina Equihua Z. es asistente editorial de Oikos=. Es bióloga y doctora de la Facultad de Ciencias, UNAM. y divulgadora de la Unidad de Divulgación y Difusión del Instituto de Ecología, UNAM.

Paisaje en Ímuris, Sonora, México. Fotografía: Tyrv via Wikimedia Commons.



Importancia de los conocimientos tradicionales e indígenas

Jorge Soberón

Hace tiempo, en el número 23 de *Oikos=*, dije que hay preguntas que parecen obvias o bobas pero que en realidad no lo son. Una es la pregunta sobre la importancia de los conocimientos tradicionales: ¿existen?, ¿son útiles?

Aquí voy a presentar algunas ideas sobre este tema, que en buena medida se derivan de que ahora tengo la responsabilidad de darle al Museo de Historia Natural de Kansas (https://biodiversity.ku.edu/) una perspectiva multicultural. A propósito, voy a evitar que la reflexión que les presento esté informada por la moderna perspectiva de poderosos *vs.* avasallados, colonial *vs.* descolonializado. Obviamente esta perspectiva ilumina algo real e importante, pero trabajo en un museo de un país desarrollado, y por ende me resulta evidente que estas instituciones tienen orígenes colonialistas. Mi interés principal no es reivindicativo, sino transformativo: darle una perspectiva multicultural a las exhibiciones del museo, más que corregir injusticias de hace un siglo o más.

Validez

En primer lugar, no hace falta repetir algo evidente: todas las comunidades indígenas y tradicionales del mundo son capaces de *conocer* de manera *válida* el mundo natural a su alrededor. Por *conocer* quiero decir construir representaciones mentales de dicho mundo, y por *válida* quiero decir que dichas representaciones se corresponden con el mundo externo lo suficiente como para predecir y tomar decisiones prácticas, a menudo de consecuencias vitales.

Hay cientos o tal vez miles de ejemplos de ese conocimiento válido tradicional: taxonomía de suelos, tecnologías agrícolas, propiedades de plantas medicinales, navegación, etología de animales presa o depredadores, climatología, astronomía (al final incluyo unas referencias que las ilustran).

Me atrevo a sugerir que, en esencia, solamente hay una forma de conocer el mundo natural: se observa la naturaleza, se piensa sobre ella y se contrastan esas ideas. Este simple esquema no es patrimonio de una cultura, todo el que vive en el mundo material hace esto y se trata de una habilidad natural del ser humano. Pero los detalles de lo anterior cambian de manera radical no solo entre disciplinas —por ejemplo, énfasis en experimentos *vs.* observaciones, o representaciones matemáticas *vs.* verbales—, sino de cultura a cultura.

Praxis, kosmos y *corpus*

En 1992, Víctor Toledo introdujo un esquema para analizar la manera como diferentes culturas perciben, expresan y usan la naturaleza a su alrededor. Para Víctor existen tres grandes componentes: el llamado *corpus*, esto es, el conjunto de datos y aseveraciones sobre el mundo natural: esta planta se come, esta da alucinaciones, esta otra baja la fiebre; este suelo da muy buen maíz, este no; esa estrella aparece cuando ya va a caer la escarcha; esta madera aguanta hormigas, aquella no… El *corpus* de cualquier cultura es el resultado de un largo proceso histórico y comunitario de observación y análisis; su valor práctico, a menudo local, es evidente. Sin una profunda capacidad de conocer su entorno, simplemente ningún grupo humano habría sobrevivido.

Hay ejemplos de que los conocimientos contenidos en los diferentes *corpora* pudieran ser compartidos entre varias culturas. Por ejemplo, las propiedades medicinales de plantas como *Datura* spp. son conocidas independientemente de la cultura. Probablemente la superposición (o el acuerdo) entre *corpora* sea bastante amplia, y esto explica, entre otras cosas, ¡la posibilidad de la biopiratería!

Sin embargo, según Toledo, un *corpus* cualquiera se expresa y adquiere sentido en el contexto de otros dos elementos: la *praxis*, que es el uso que se hace de un *corpus* —producir comida, curar enfermedades, orientarse, construir, y en las culturas modernas, vender—, y el *kosmos*, que es la estructura propiamente cultural que articula el *corpus* y la *praxis*.

El *kosmos* de la ciencia occidental es individualista, comercialista, universalista (algunos dirían imperialista), ateo o al menos secular, inmanente, o sea, opuesto a trascendente. Los criterios de verdad son abstractos y pretenden estar libres de valoraciones éticas. El *kosmos* de la ciencia occidental a partir de la Ilustración separa radicalmente epistemología, ética y estética (véase Eco, 2002, como contraste).

Por el contrario, Nancy Turner (2014) explica que los *kosmoi* de los conocimientos tradicionales son en muchos casos míticos, religiosos, comunitarios, locales, humildes, respetuosos. Los criterios de verdad tienden a estar asociados a un "vivir bien" —el *Tlamatini*, o sabio de los aztecas, era "el guía en los asuntos humanos"—. Los conocimientos tradicionales están indisolublemente ligados a una sustentabilidad ambiental y social. En las cosmovisiones tradicionales, lo "real", lo verdadero, coincide con lo

bello y con lo bueno, como escribe tan bien Robin W. Kimmerer (de la etnia Potawatomi) en su libro [Braiding Sweetgrass](#)de 2013:

> "Nuestros ojos están maravillosamente adaptados a percibir los colores de las flores en una pradera, pero ¿por qué consideramos esos colores bellos? La pregunta biológica sobre el color de las flores como atrayente para las abejas debería estar ligada a la pregunta estética de por qué los humanos consideramos eso "bello".

El esquema propuesto por Víctor Toledo (1992, 2000) me parece muy acertado. Separa claramente áreas donde es posible que diferentes culturas se pongan de acuerdo (los *corpora*) de otras donde van a existir diferencias radicales (secularidad *vs.* religiosidad de *kosmoi*, por ejemplo). Toledo no propone una partición simplista: *corpus*, *praxis* y *kosmos* están íntimamente ligados y se influyen mutuamente; pero este sencillo esquema es tremendamente útil para analizar el asunto de los conocimientos tradicionales, donde parecería que las diferencias se encuentran sobre todo en los *kosmoi*.

Resulta claro entonces que una científica occidental puede perfectamente apreciar la validez de datos, por ejemplo sobre los efectos fisiológicos de consumir especies de *Datura* (datos que provienen de culturas de las Américas, Africa, la India…) que es algo que corresponde a los *corpora*, al mismo tiempo que ignora, en general (aunque puede ser que la ceremonia sea parte del efecto), las ceremonias religiosas o mágicas asociadas a consumir toloache (o *Jimson Weed*, *jouzmathel*, *dhatura*, *mmofra awhenee*, *anjlenjle*…). La parte ceremonial y mágica corresponde a los *kosmoi*. El efecto alucinogénico, las dosis, corresponden a los *corpora*.

Cuando las actuales autoridades del CONACYT sugieren en una publicación del 3 de julio de 2019 en Twitter (https://bit.ly/3zyHdTr) que valoremos, respetemos y usemos los conocimientos tradicionales, sospecho que piensan en los *corpora*, porque no me imagino que piensen en realizar sacrificios al inicio de la cosecha o en invocar alguna divinidad antes de consumir un té de epazote. Esta sospecha conduce de inmediato a dos preguntas:



La Dra. Álvarez-Buylla, directora del Conacyt, llama a incorporar la visión humanística en la ciencia y la tecnología, desde la diversidad, sumando las distintas formas de conocimiento tradicional.
#CienciaTierraAdentro

Publicación de CONACYT en la red social Twitter el 3 de julio, 2019 (https://bit.ly/3zyHdTr) sobre el uso del conocimiento tradicional.



Mural de Diego Rivera. *El hombre, controlador del universo* (1934) plasmado originalmente en el Centro Rockefeller de Nueva York, EUA, pero destruido por la familia Rockefeller. Rivera reelaboró el mural en fresco en un bastidor metálico. La obra se expone en el Palacio de Bellas Artes de la Ciudad de México. Imagen: Wikimedia Commons.



(i) ¿Podemos simplemente apropiarnos del *corpus* de alguna cultura? La respuesta es NO. Existen protocolos, procedimientos y hasta legislación (Artículo 8(j) del Convenio Sobre Diversidad Biológica, y su Protocolo de Nagoya) que prohíben la apropiación unilateral —la biopiratería es un ejemplo— del conocimiento tradicional.

(ii) ¿Existe algo de valor digamos "universal" o "transcultural" en los *kosmoi* de diferentes culturas? La respuesta es probablemente SÍ. Este punto es fascinante y ha sido discutido por muchos, incluyendo a Víctor Toledo en el trabajo antes mencionado.

El contraste entre lo que llamaría el *kosmos* del conocimiento científico occidental (posilustración) y muchos *kosmoi* tradicionales es agudo. El occidental, además de tener las características que mencioné antes, ignora o desprecia las implicaciones éticas y estéticas del trabajo. Toda la praxis científica moderna se basa en "des-encantar" la naturaleza (Nasr, 1996; Weber, 1958), despojar a los elementos naturales de propósito, simbolismo, de cualidades no físicas…

En la práctica —aunque la conducta de los individuos varía mucho—, el *kosmos* de la ciencia moderna conduce a una gran arrogancia, expresada en la idea del humano como controlador o manejador del mundo natural. Esto es lo que se encuentra en la narrativa cultural que articula toda la práctica científica al menos desde el siglo XIX, y está firmemente enraizado en las bases culturales de occidente. Un ejemplo es el mural de Diego Rivera *El hombre, controlador del universo*, donde hay un rubio "controlando" al universo.

Evidentemente, este *kosmos* occidental fundamenta la innegable explosión del conocimiento científico desde el Renacimiento. También explica el olímpico desprecio, el "des-encanto" que la cultura dominante asigna al mundo natural.

Por el contrario, los *kosmoi* tradicionales, según expertas como Nancy Turner (2014), generalmente tienden a no separar lo ético y lo estético. Alaban una actitud humilde, que enfatiza la pertenencia humana al mundo natural, y en general parten de la premisa de que los beneficios de la naturaleza son dádivas por las que hay que estar agradecido, no conquistas arrancadas por la fuerza de la economía o la ciencia. La actitud de los pueblos originarios que comparten un *kosmos* es muy diferente de la de los practicantes del *kosmos* de la ciencia occidental.

Pero notemos que no se trata de los conocimientos de unos u otros; se trata de la cultura, la expresión entera de una concepción del mundo que incluye también a la ciencia. Es aquí donde creo que está el valor profundo de los "conocimientos indígenas": en los aspectos de sus *kosmoi* que enfatizan el respeto, el cuidado, la cautela, el asombro y el agradecimiento ante lo natural.

Es claro que con frecuencia un *corpus* indígena puede aumentar o complementar el *corpus* occidental. Sin embargo, en mi vena de aventurarme a hablar de lo que no sé, intuyo que lo que debemos aprenderles a las culturas de los pueblos tradicionales está en su actitud ante la naturaleza, más que en sus datos sobre ella. Intuyo también que el problema de re-encantar la naturaleza, imitando los *kosmoi* indígenas pero viviendo a la moderna, no tiene una solución trivial…

Jorge Soberón obtuvo el título de biólogo y de maestro en ciencias de la Facultad de Ciencias de la UNAM y es doctor por el Imperial College de Londres, RU. Actualmente es profesor distinguido del Departamento de Ecología y Biología Evolutiva de la Universidad de Kansas, EE.UU. Su principal interés es documentar y entender los patrones de biodiversidad a gran escala, en particular de las especies terrestres.

Para saber más

- Bautista, F. y J.A. Zinck. (2010). Construction of an Yucatec Maya soil classification and comparison with the WRB framework. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 6: 1-11. https://bit.ly/3dHkKfp
- Eco, U. (2002). *Art and beauty in the middle ages*. Yale University Press. EUA. https://bit.ly/3wuyqRz
- Genz, J., J. Aucan, M. Merrifield, B. Finney, K. Joel y A. Kelen. (2009). Wave navigation in the Marshall Islands: Comparing indigenous and Western scientific knowledge of the ocean. *Oceanography*, 22: 234-245 https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.52
- Kimmerer, R. (2013). *Braiding sweetgrass: Indigenous wisdom, scientific knowledge and the teachings of plants*. Milkweed editions. EE.UU. https://bit.ly/3pNAujH
- Nasr, S.H. (1996). *Religion and the Order of Nature: The 1994 Cadbury Lectures at the University of Birmingham*. Oxford University Press. https://academic.oup.com/book/27243
- Orlove, B.S., J.C. Chiang y M.A. Cane. (2000). Forecasting Andean rainfall and crop yield from the influence of El Niño on Pleiades visibility. *Nature*, 403: 68-7. https://www.nature.com/articles/47456
- Toledo, V.M. (1992). What is ethnoecology?: origins, scope and implications of a rising discipline. *Etnoecologica* 1: 5-21 https://bit.ly/3KkDYDK
- Toledo, V.M. (2000). Indigenous peoples and biodiversity. Pp. 451-463. En Simon Asher Levin. *Encyclopedia of biodiversity*, 3. https://doi.org/10.1016/B0-12-226865-2/00157-7
- Turner, N.J. (2014). *Ancient pathways, ancestral knowledge: ethnobotany and ecological wisdom of indigenous peoples of northwestern North America*. 2 vols. McGill-Queen's Press. https://bit.ly/3AHY8oh
- Weber, M. (1958). Science as a Vocation. *Daedalus*, 87: 111-134. https://bit.ly/3pDdKTL

La conectividad del paisaje y su importancia para los mamíferos de la Ciudad de México

Pablo César Hernández Romero, Carlos E. Muench Spitzer, Diego Magaña Rodríguez, María del Coro Arizmendi y David A. Prieto Torres

La conservación de la biodiversidad depende cada vez más de su correcto manejo en los paisajes modificados por la actividad humana, ya que el acelerado proceso de urbanización es una amenaza importante para la biodiversidad. Lamentablemente, como sociedad hemos implementado modelos de desarrollo que favorecen el crecimiento económico, incluso a costa del beneficio social y ambiental. De hecho, la urbanización involucra múltiples procesos, como el cambio de uso del suelo, la fragmentación del hábitat, o el incremento de la contaminación, que producen impactos negativos en la biodiversidad. Pero paradójicamente, cada vez es más claro que incluso las ciudades pueden jugar un papel importante para la conservación de la biodiversidad, principalmente mediante la planeación cuidadosa y el manejo sustentable de las áreas verdes urbanas y de otros espacios naturales que ellas contienen.

Dado el papel potencialmente importante de las ciudades en la conservación biológica, urbanistas y tomadores de decisión en políticas públicas promueven cada vez con mayor frecuencia la inclusión de la naturaleza como un componente fundamental del diseño y la planificación urbana, no sólo como un equipamiento estético, sino también como un importante activo ambiental e incluso económico. Es por eso que cada vez es más evidente la necesidad de proteger el capital natural y de valorar los servicios de los ecosistemas dentro de las ciudades.

No obstante, muchas de las iniciativas de los gobiernos orientadas al diseño e implementación de espacios verdes, incluyendo la recuperación de espacios públicos, se realizan sin considerar aspectos básicos de la ecología de las especies que ya viven en las ciudades o de las que podrían alojar. De hecho, las actividades de planeación urbana relacionadas con los espacios verdes suelen ignorar conceptos básicos que la biología de la conservación ha definido para eficientizar sus esfuerzos, como son la *integridad ecosistémica* y la *complementariedad* en la composición de especies y la conectividad del paisaje.

Integridad ecosistémica
Se refiere a un modelo que describe la situación y condición actual de los ecosistemas, incluyendo aspectos como riqueza de especies (variedad de especies en un ambiente determinado), cobertura vegetal, etcétera, con respecto a la que tendría ese mismo ecosistema en ausencia de perturbaciones antrópicas.

Complementariedad de especies
Se refiere al grado de diferencias entre las especies presentes en un área en relación con otras, lo cual permite identificar espacios geográficos en donde hay especies (o características) únicas, consideradas frecuentemente como prioridades de conservación.

La conectividad del paisaje y su relevancia en la conservación

La fragmentación de los ecosistemas en el planeta es uno de los elementos más importantes que atenta contra su funcionamiento y su capacidad de proveer servicios a las comunidades humanas. Por ello, se considera que aumentar, o cuando menos conservar, la conectividad del paisaje es la apuesta indicada para contribuir a mitigar el acelerado ritmo en la pérdida de la biodiversidad en todo el planeta.

Pero *¿qué es exactamente la conectividad del paisaje?* En términos generales, podemos definirla como el grado de conexión que hay entre los parches de vegetación presentes en un paisaje, lo cual facilita, o dificulta, que los organismos puedan moverse entre dichos parches, manteniendo así las interacciones entre sus poblaciones, que pueden ser desde los polinizadores y las plantas que polinizan, las relaciones para reproducirse hasta los depredadores buscando presas, entre otras. Esta conexión, como se ilustra en la Figura 1, puede ser concebida tanto en términos estructurales, como es la continuidad espacial de la vegetación (ej. la existencia de corredores que conectan los parches en el paisaje), como funcional, en donde además de la estructura del paisaje se consideran las características biológicas y ecológicas de las especies que determinan su movilidad, tales como sus preferencias de hábitat, sus modos de desplazamiento, su tamaño corporal o su dieta.

El grado de conexión entre los parches de vegetación en un paisaje influye en los riesgos de extinción de las poblaciones de cualquier animal silvestre, debido a que, en poblaciones pe-



queñas, por ejemplo, los individuos tienen una mayor dificultad para encontrar parejas reproductivas y los recursos esenciales para su supervivencia, además de ser más susceptibles a procesos de *deterioro genético*. La reducción y extinción de las poblaciones de animales en estos parches de vegetación también afecta la estabilidad de los ecosistemas dentro y en los entornos de la ciudad, así como de los servicios que aportan a la humanidad.

Mantener y restaurar la conectividad del paisaje es esencial para gestionar ecosistemas urbanos saludables, ya que al estar bien conectados sustentan una mayor diversidad no solo de especies, sino que también de importantes funciones ecológicas, como son la polinización, la dispersión de semillas, resistencia a enfermedades y la *resiliencia climática*. Por ello, la comunidad científica tiene un creciente interés en identificar y caracterizar los sitios de alto valor ambiental que favorezcan al incremento de la conectividad ecológica en las ciudades, tanto a escalas locales como regionales. Estos esfuerzos de identificación y caracterización son críticos para aumentar la sustentabilidad y resiliencia de las ciudades, para lograr establecer un equilibrio entre la conservación y manejo de los recursos con la expansión de los entornos urbanos, el desarrollo económico, las necesidades y aspiraciones humanas.

Deterioro genético
Se refiere a la perdida de variabilidad de los genes dentro de las poblaciones de una especie, lo cual conlleva a la aparición de anormalidades de estructura o función en los organismos, amenazando su vida.

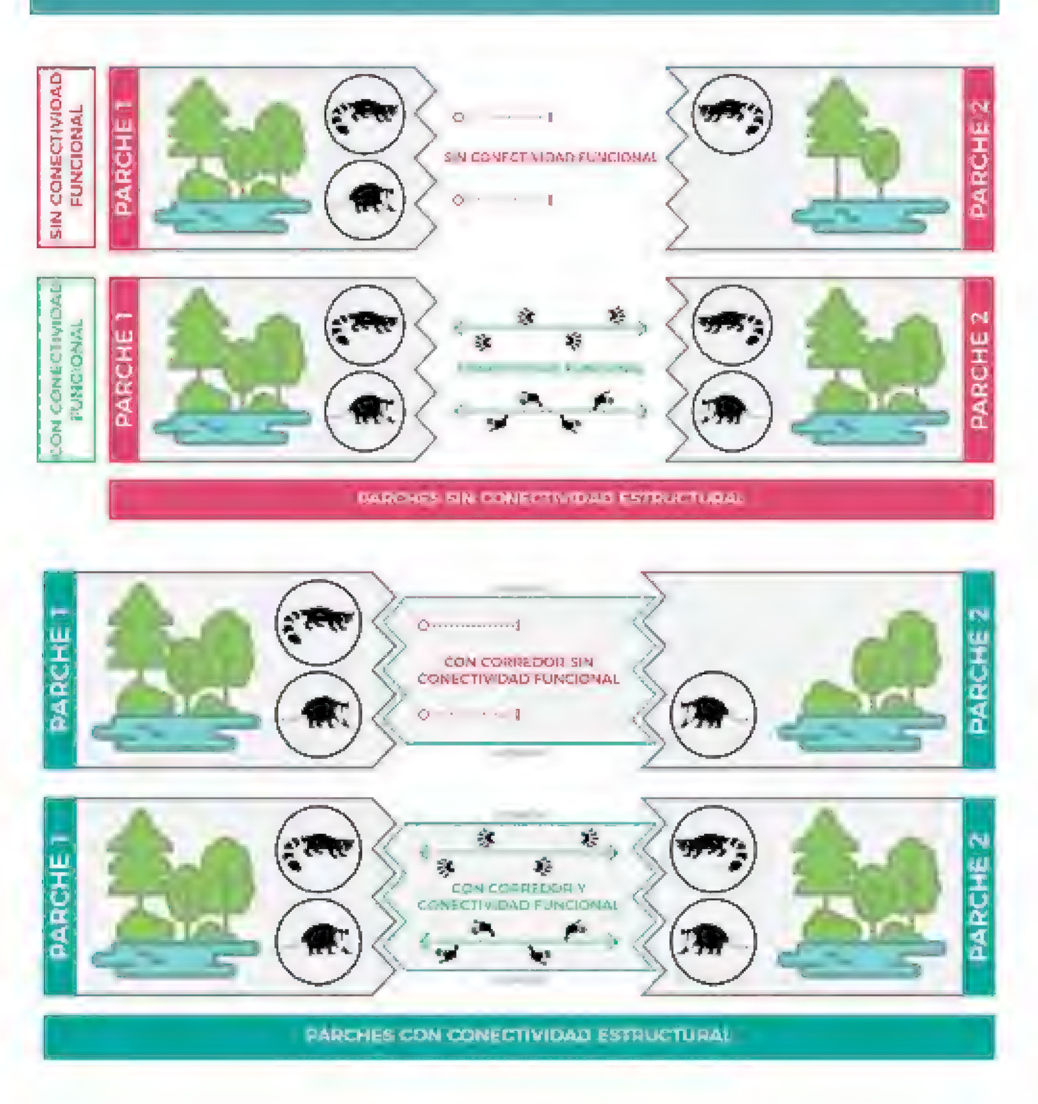


Figura 1. Diagrama representativo de la conectividad del paisaje, ejemplificando los casos de conectividad estructural y/o funcional entre diferentes parches de vegetación. Imagen elaboración propia.

Resiliencia climática
Capacidad de un ecosistema o especies de recuperar sus condiciones y propiedades después de ser sometido a perturbaciones o cambios en el clima.

Ciudad de México, un importante caso de estudio

La Ciudad de México (CDMX) es una de las urbes más grandes del mundo y en ella existen extensas áreas definidas legalmente como "Suelo de Conservación" (SC, véase *¿Somos tan verdes como decimos? Análisis de las áreas verdes de la Ciudad de México* en *Oikos=* 22), conformadas por bosques, matorrales, humedales y zonas agrícolas que abarcan casi el 60% de su superficie territorial (aproximadamente 89,500 ha), como mostramos en la Figura 2. Estas áreas, junto con las áreas protegidas de la CDMX, ilustradas en la Figura 2, tienen una gran importancia para la conservación de la biodiversidad de la región, así como para la provisión de servicios ambientales claves (p.ej. recarga de los acuíferos, captura de carbono y producción de alimentos, entre otros) que sustentan el bienestar y desarrollo de toda su población.

No obstante, sabemos que el crecimiento urbano desordenado o poco planificado en la CDMX continúa transformando estos espacios naturales, fragmentando los ecosistemas nativos y amenazando los procesos ecológicos que mantienen su integridad ecosistémica. De hecho, actualmente más de 3,000 ha del SC se encuentran ocupadas por asentamientos humanos irregulares (ver SEDEMA 2016). Esta situación amenaza con ocasionar eventos de extinción local de diversas especies de animales y plantas, lo cual podría implicar daños irreparables al capital natural de la cuenca de México. De continuar este proceso de transformación en las áreas de SC de la CDMX, se afectaría la ya insuficiente capacidad de recarga de sus acuíferos, se aumentaría la contaminación ambiental e incluso limitaríamos el potencial de estos espacios para mitigar los impactos de amenazas como el cambio climático.

Por ello, es necesario dar un primer paso para evaluar el estado actual de las poblaciones silvestres en los espacios verdes de la ciudad, incluyendo las áreas de SC, y desarrollar investigaciones que permitan entender cómo la biodiversidad está siendo afectada en los diferentes contextos espaciales y socioeconómicos de la urbe. Esta información ayudaría no sólo a entender el aislamiento de las poblaciones a diferentes escalas, sino a fortalecer el proceso de toma de decisiones en el ámbito de política pública, contribuyendo a la planeación y diseño de proyectos urbanísticos enfocados en la conservación y restauración de ecosistemas dentro de la ciudad. Este tipo de estudios ya se consideran como prioritarios dentro de la *Estrategia para la Conservación y el Uso Sustentable de la Biodiversidad de la Ciudad de México* (ECUSBE-CDMX,) y Plan de Acción 2016-2030 (https://bit.ly/3PM4nM8), desarrollado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiver-



sidad (CONABIO) y el Gobierno de la CDMX a través de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA).

¿Qué conocemos de los mamíferos de la CDMX?

Contar con información sobre la presencia, y en dado caso la ausencia, la abundancia y el número de especies de mamíferos presentes en un área es clave para comprender los impactos de las actividades humanas sobre la biodiversidad. Estos "vecinos" particulares, elusivos a la presencia humana, pero con quienes día a día compartimos el espacio y los recursos de nuestra ciudad, desempeñan importantes funciones ecológicas como son la dispersión de las semillas, la herbivoría y el control de especies nocivas, entre otras funciones vitales para el bienestar y funcionamiento de los ecosistemas en el SC. No obstante, son pocos los estudios como el de Navarro-Frías y colaboradores en el 2007, dedicados a evaluar los patrones poblacionales y de distribución de los mamíferos silvestres presentes en la CDMX. Gran parte de estos trabajos se han enfocado solamente en conocer cuáles son las especies silvestres que aún se mantienen en los espacios verdes urbanos y en los alrededores de la ciudad. Ejemplo de ello son los trabajos desarrollados por Hortelano-Moncada y colaboradores, en 2009 y 2021, donde se enlistan los mamíferos presentes en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) y en el norte de la CDMX.

Uno de los principales factores que dificulta el analizar de manera integral la diversidad de mamíferos presentes en la CDMX ha sido la falta de información sistematizada y precisa sobre su distribución, abundancias y patrones de movimiento a lo largo de la ciudad. Esta información es claramente indispensable para determinar cuáles son los grados de conectividad del paisaje para este grupo biológico. Afortunadamente, hoy en día ya existen diversas bases de datos que contienen información sobre presencia histórica de las especies, por ejemplo, las bases de datos del Instituto de Biología de la UNAM y la *Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad* (GBIF por sus siglas en inglés; https://www.gbif.org/), las cuales además son accesibles desde cualquier parte del mundo. Asimismo, gracias al desarrollo tecnológico, se han mejorado mucho las técnicas de detección y muestreo de los animales silvestres, como también se ilustra en la Figura 2. Dentro de las técnicas modernas que ayudan al estudio de la fauna silvestre, podemos mencionar el foto-trampeo (uso de dispositivos con sensores de movimiento que permiten capturar imágenes fotográficas de animales) y al uso de plataformas de *ciencia ciudadana* como *iNaturalista* (https://www.naturalista.mx/), que promueven la participación de la ciudadanía en el estudio y monitoreo de la biodiversidad. Gracias a ellas se ha incrementado en los últimos años la disponibilidad de información sobre los mamíferos que habitan en la CDMX. Sin embargo, mucha de esta información no ha sido sistematizada o analizada de manera integral, tarea que hemos emprendido para convertir esta información en conocimiento sobre la distribución de las especies y la riqueza de los espacios verdes de la ciudad.

De las bases de datos, el portal de ciencia ciudadana *iNaturalista* y entrevistas realizadas a la ciudadanía en general,

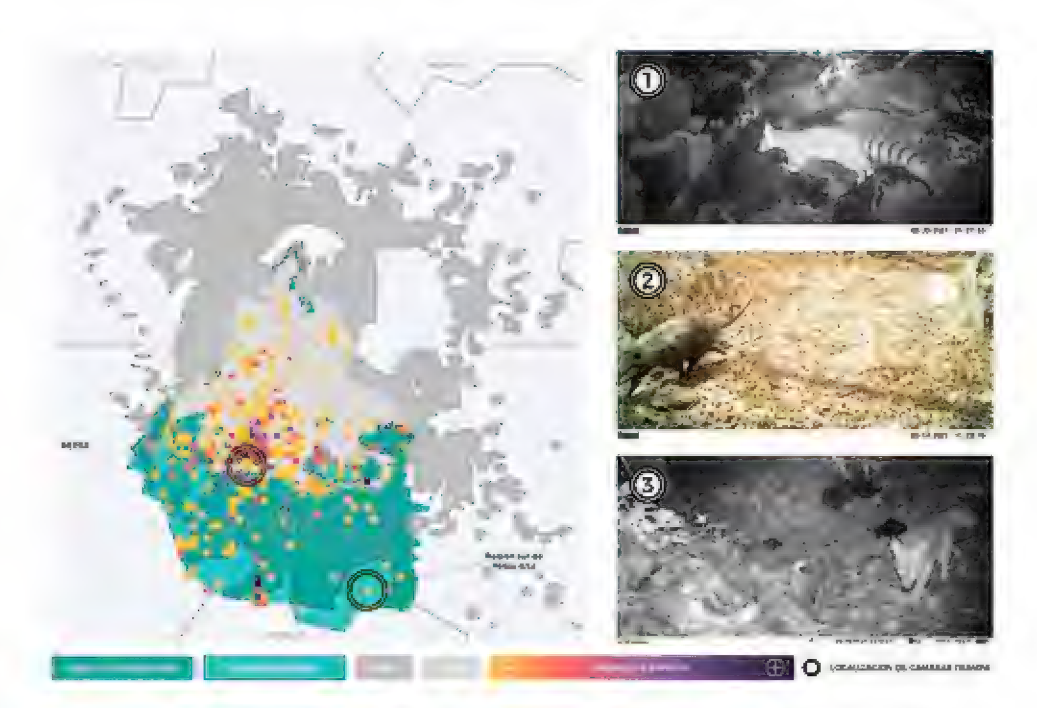


Figura 2. Patrones de riqueza de mamíferos terrestres en la Ciudad de México considerando los 293 sitios con registros de avistamientos entre 2016 y 2021. En el mapa se señalan la posición geográfica de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) y la región sur de Milpa Alta, así como los registros fotográficos de tres especies: (1) el Cacomixtle norteño (*Bassariscus astutus*); (2) la Zorra gris (*Urocyon cineroargenteus nigrirostris*); y (3) el Tlacuache (*Didelphis virginiana*). Imágenes elaboración propia.

obtuvimos un total de 5,269 registros para 293 sitios, lo cual sólo representa un 17% de la superficie de la ciudad (Figura 2). Esta información corresponde a 64 especies de mamíferos, las cuales se agrupan en 19 familias y 46 géneros. El grupo con el mayor número de especies reportadas fue el de los roedores: ratas, ratones y ardillas (*n* = 23), seguido por los murciélagos (*n* = 16) y los carnívoros, particularmente cacomixtles, comadrejas y zorras (*n* = 11). Esto no es sorprendente, ya que de hecho estos grupos corresponden a los de mayor diversidad entre los mamíferos. Por lo menos seis especies son endémicas, es decir, solo viven en la región del centro de México y, por ello, tenemos la responsabilidad moral de conservarlas: el conejo de los volcanes (*Romerolagus diazii*), la ardilla cuinique (*Notocitellus adocetus*), el conejo mexicano de monte (*Sylvilagus cunicularius*), la musaraña coluda (*Sorex ventralis*), el motocle o ardillón (*Ictidomys mexicanus*) y la musaraña de orejas pequeñas (*Cryptotis alticola*). La REPSA y la región sur de Milpa Alta, señaladas en la Figura 2, son particularmente importantes para la conservación de este grupo biológico por el número de especies reportadas y el estado de conservación del hábitat.

¿Qué tan conectadas están las áreas donde viven los mamíferos en la CDMX?

Para caracterizar los grados de conectividad del paisaje en la CDMX, identificamos en qué zonas hay una menor y una mayor concentración de 31 de las 64 especies de mamíferos no voladores reportadas para la zona. A esto lo denominamos patrones de riqueza, que se muestran en la Figura 2 en los cuadros, que van de amarillo en los sitios con menos especies, a colores más obscuros en los lugares más ricos en especies. Estas 31 especies han sido reportadas y observadas en la ciudad durante los últimos seis (6) años de acuerdo con las bases de datos consultadas y las entrevistas



realizadas. Observamos que en donde hay más especies es en las áreas del centro-poniente y sur de la ciudad, principalmente en la REPSA, el Bosque de Chapultepec y el Bosque de Tlalpan. También evaluamos qué tan parecidas (similitud) son las localidades, considerando tanto el número de especies presentes (la riqueza taxonómica) como el conjunto de características ecológicas que tienen esas especies, es decir qué papel juega cada una de ellas en el ecosistema, que es una medida de su riqueza funcional.

En general, los mapas muestran una relación directa entre los valores de riqueza taxonómica y funcional, es decir, se observa que aquellos sitios con mayor número de especies son también los que están mejor representados desde la perspectiva ecológica, debido a que coexisten especies de diferentes tamaños o con diferentes hábitos alimenticios. La diversidad de mamíferos fue mayor dentro de la red actual de áreas naturales protegidas en la ciudad que en otros espacios. No obstante, estos resultados sugieren que la composición de las comunidades de mamíferos en el sur de la CDMX es muy diferente entre los sitios, lo que indica que hay poca conectividad funcional, es decir, muchas especies no pueden moverse de un área verde a otra.

Aunque indudablemente en este momento las áreas naturales protegidas de la CDMX desempeñan un importante papel en proteger la biodiversidad, consideramos que es posible que el grado de aislamiento entre muchas de ellas esté impidiendo la movilidad de muchas especies. Las áreas protegidas cercanas entre sí tienden a tener valores de similitud más altos, es decir, tienen muchas especies en común, pero este patrón no se observa en toda la ciudad, lo que indica que la conectividad del paisaje en la ciudad es afectada por la distancia entre parches, la inexistencia de corredores biológicos y la limitada capacidad de dispersión de los organismos. Esto no es sorprendente, ya que ciertos elementos del paisaje, como una avenida con mucho tránsito, pueden representar barreras casi infranqueables entre dos parches de vegetación, aunque estén muy cercanos. Por ello, se requiere de calles con más arbolado y vegetación urbana que permitan facilitar la conectividad del paisaje.

Desafíos y oportunidades por atender a futuro

Nuestro estudio no se basa en este momento en muestreos sistemáticos con una sola metodología, sino que se realizó, como lo mencionamos en párrafos previos, compilando, ordenando, analizando e interpretando datos que se obtuvieron previamente de observaciones de ciencia ciudadana o de colecciones históricas. Por ello, y dado el vacío de información que persiste a lo largo de la CDMX y como se desprende de ver las amplias áreas sin datos como se muestra en la Figura 2, pensamos que es necesario realizar más estudios enfocados en analizar los patrones de distribución y las dinámicas de desplazamiento de las especies entre las áreas verdes de la ciudad. Dos especies que pueden ser buenos modelos para este tipo de estudios, considerando sus altos números de avistamiento y su presencia tanto en áreas naturales como en aquellas fuertemente modificadas por el ser humano, son el Cacomixtle norteño (*Bassariscus astutus*) y el Tlacuache (*Didelphis virginiana*; Figura 2).

Investigación-acción
Consiste en la búsqueda colectiva entre los sectores de la academia, del gobierno y la sociedad civil, para el estudio y solución de problemas socio-ambientales, de manera que se logren simultáneamente conocimientos y cambios sociales.

Para lograr aumentar la conectividad del paisaje en la CDMX, es fundamental entender cómo la afectan diferentes elementos (ej. la presencia de edificios, carreteras, etc.) del paisaje urbano, configuraciones espaciales (ej. áreas verdes extensas vs. camellones) y regímenes de manejo de las áreas verdes (ej. frecuencia de podas, manejo de residuos, etc.). Los resultados que presentamos en esta contribución son un primer paso para alcanzar esta meta, pues permiten identificar vacíos de información y plantear preguntas de investigación pertinentes y los métodos adecuados para responderlas. En este sentido, nos parece necesario fomentar e incrementar la participación de la ciudadanía tanto en los proyectos de investigación como en las actividades de manejo y conservación de los espacios verdes urbanos y periurbanos. Nuestro proyecto de investigación tiene precisamente esta meta, por ello mantenemos abierta la invitación para participar a todos aquellos interesados en el manejo sustentable de este tipo de espacios y la conservación de la biodiversidad.

Los paradigmas emergentes de *investigación-acción* y ciencia ciudadana ayudan a generar una gran cantidad de información que permite estimar la situación actual de las especies, incluyendo la identificación de amenazas para la fauna propias de entornos urbanos. Sin duda, la participación social en proyectos de ecología urbana contribuye a fortalecer el sentido de pertenencia al territorio, porque fomenta el cuidado de las especies silvestres y áreas verdes que forman parte del entorno de los ciudadanos y mejora las posibilidades de éxito de las acciones de conservación. Transitar hacia un esquema de co-generación de conocimiento y co-manejo de los espacios verdes urbanos, con acciones basadas en información científica robusta que atiendan los problemas socioambientales desde los intereses y necesidades de quienes los enfrentan, es la mejor apuesta para avanzar hacia una mayor conectividad ecológica y social, ambos fundamentales para la sustentabilidad urbana.

Agradecimientos

Al Programa de "Estancias Posdoctorales por México, Modalidad 3 y 4" del CONACyT por el apoyo recibido para el proyecto del Dr. Pablo Hernández, así como al Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC), de la UNAM, por el financiamiento recibido para el proyecto *La Megalópolis mexicana en la crisis climática: ¿existen oportunidades para la conservación de la biodiversidad?*. Además, agradecemos la colaboración y el apoyo logístico presta-

do por la Reserva Ecológica Pedregal de San Ángel (REPSA) de la UNAM, a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y a la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). De igual manera a los colonos de "Jardines de la Montaña" y "Jardines del Pedregal" por su apoyo durante la realización de las actividades de monitoreo de fauna. Las biólogas Deborah García y Abigail Urbina colaboraron con la búsqueda de registros históricos y el trabajo de campo.

Pablo César Hernández Romero es biólogo egresado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, especialista en ecología de vertebrados. Realizó su maestría y doctorado en el INECOL, A.C. bajo las líneas de conservación y biodiversidad. Actualmente es personal académico posdoctoral del CONACYT, adscrito a la Facultad de Estudios Superiores (FES) Iztacala, UNAM.

Carlos E. Muench Spitzer es biólogo egresado de la Facultad de Ciencias de la UNAM y Doctor en Ciencias Biológicas por la misma universidad. Actualmente labora en la Coordinación Universitaria para la Sustentabilidad (COUS) de la UNAM. Trabaja en temas de ecología del paisaje, conservación comunitaria y ciencia ciudadana en el manejo y conservación de mamíferos silvestres.

Diego Magaña Rodríguez es arquitecto egresado de la UNAM y personal de la COUS de la UNAM. Sus líneas e intereses de investigación se enfocan en el desarrollo urbano sostenible, mediante la generación de marcos conceptuales en política pública urbana que contribuyan a la adaptación ante el cambio climático.

María del Coro Arizmendi es especialista en ecología de aves. Coordinó el proyecto Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves de México y la COUS, UNAM. Participa en el comité trinacional de la Campaña Norteamericana para la Protección de los Polinizadores (NAPPC). Es Profesora Titular de la FES Iztacala-UNAM.

David A. Prieto Torres es Biólogo de formación con un doctorado en Ciencias Biológicas del INECOL, A.C. Es Profesor Asociado de la Carrera de Biología en la FES Iztacala, UNAM. Sus principales intereses de investigación son las áreas de la biogeografía y conservación de la biodiversidad neotropical.

Para saber más

- Ceballos González, G. y Galindo Leal, C. (1984). *Mamíferos silvestres de la Cuenca de México*. Edit. Limusa, México, México, 299 pp. https://bit.ly/3cpdZ1C
- Herrera-Calvo, P.M. (2008). Infraestructuras de soporte de la Biodiversidad: Planificando el ecosistema urbano. *Ciudades* 11: 167-188. https://bit.ly/3pJsmRz
- Hortelano-Moncada Y., Cervantes F.A. y Trejo-Ortiz A. (2009). Mamíferos silvestres de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, México. D.F. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80: 507-520. https://bit.ly/3pOnU3U
- Hortelano-Moncada Y., Barragán-Saldaña A.S., Fernández-Reyes J.R., Cervantes F.A., Barragán-Guerrero L. y Gómez-Naranjo M.V. (2021). Mammal species richness and new records in protected natural areas of the northern part of the metropolitan area of the Valley of México. *Therya* 12: 537-551. https://bit.ly/3cp3b3q
- Navarro-Frías, J., González-Ruiz, G. y Álvarez-Castañeda S.T. (2007). Los mamíferos silvestres de Milpa Alta, Distrito federal: lista actualizada y consideraciones para su conservación. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.) 23:103-124. https://bit.ly/3PXCPmW
- Quintana, P. (2014). *Fragmentación del Ecosistema, un problema ecológico, político y social*. Universidad Veracruzana. https://www.uv.mx/cienciauv/blog/fragmentacion/
- Rojas, C., de la Barrera, F., Aránguiz, T., Munizaga, J. y Pino, J. (2017). Efectos de la urbanización sobre la conectividad ecológica de paisajes metropolitanos. *Revista Universitaria de Geografía* 26: 155-182. https://bit.ly/3cmnNt9
- Santos y Ganges, L. y J.L. De la Rivas Sanz. (2008). Ciudades con atributos: Conectividad, Accesibilidad y Movilidad. *Ciudades* 11: 13-32. https://bit.ly/3ThFM4F
- Secretaría del Medio Ambiente [SEDEMA]. (2016). Asentamientos Humanos Irregulares en Suelo de Conservación. Problemática y planteamientos. https://bit.ly/3PNUfCx
- Troll, C. (2010). Ecología del paisaje. *Investigación ambiental* 2: 94-105. https://bit.ly/3SVsABt



Del origen del Universo al origen del suelo

Jorge D. Etchevers y Juan F. Gallardo

Comienzo de la historia universal

Se estima que el Universo se inició hace aproximadamente 13,770 millones de años a partir de una gran explosión de *energía* (denominada en inglés *The Big Bang*) que se proyectó en todas direcciones. En el instante en que ocurrió la explosión se echó a andar el reloj del tiempo del Universo, que continúa su expansión hasta nuestros días. Aunque la teoría del *Big-Bang* no es aceptada por todos los estudiosos, es la más ampliamente reconocida.

Los primeros átomos que se formaron durante la explosión fueron los de los gases hidrógeno (H) y helio (He), los más simples de todos, que constituyeron los núcleos iniciales de lo que hoy conocemos como materia. Los átomos de H (constituido por un protón positivo y un electrón negativo, con número atómico 1, por tanto neutro; se suele presentar en la Naturaleza como una molécula diatómica, esto es, H_2) se acumularon hasta alcanzar un punto en que colapsaron, originando, al fusionarse, energía suficiente para dar lugar al He (monoatómico, con dos protones y dos electrones, por lo que su número atómico es 2); se trata de un gas noble (o gas inerte). De esta manera, se comenzaron a formar paulatinamente las primeras galaxias (Figura 1).



Figura 1. A partir del Big Bang se comenzaron a formar paulatinamente las primeras galaxias. Imagen NASA.

Durante el inicio del Universo todo fue oscuridad (Edad Oscura) hasta el comienzo del periodo denominado "Amanecer cósmico". Las galaxias que constituyen el universo se fueron formando con el tiempo; así, las más distantes se encuentran hoy a una distancia promedio de 11,700 millones de años-luz (un año-luz es la distancia que recorre la luz en un año viajando a una velocidad de 299,792.458 km por segundo). Las estrellas que vemos comenzaron a formarse cuando el Universo tenía unos 2,000 millones de años de existencia, aunque las primeras estrellas nacieron hace aproximadamente 9,000 millones de años. El Sol se formó posteriormente, muchos millones de años después de haber concluido la "Edad oscura", hace unos 4,600 millones de años.

Comienzo de la historia terrestre: ¿cómo se formó?

Para saber cómo se formó el planeta Tierra daremos un enorme salto temporal para trasladarnos varios miles de millones de años después del momento *Big-Bang*, hacia -4, 500 millones de años antes del presente.

Los científicos han propuesto dos teorías acerca de cómo se formó nuestro planeta y el sistema solar:

1. *Teoría catastrófica*. Habrían intervenido fuerzas externas en el entorno del Sol, que originaron la formación de los planetas, todos más o menos en el mismo periodo, dando lugar al sistema solar.
2. *Teoría unitaria* (natural o evolutiva). Postula que primero se habría formado el Sol y luego se originaron los planetas, con escasa intervención de objetos celestes externos; es decir, ocurrió una evolución gradual de la formación del sistema planetario. La Tierra se habría formado como consecuencia de la unión de fragmentos de rocas espaciales más pequeñas y de los denominados planetesimales (agregados de materia espacial a partir de los cuales nacen, tras un lento proceso de crecimiento, los protoplanetas y, luego, los planetas) hasta dar forma a la Tierra actual y su satélite Luna (probablemente formada a causa de un gran impacto de otro cuerpo celeste, que habría dado como resultado su formación hace unos -4,500 millones de años, esto es, casi al inicio de la formación terrestre). Ambos cuerpos espaciales habrían sido modificados por colisiones anteriores y posteriores con otros cuerpos celestes, como los temidos meteoritos (que en las superficies de la Luna o Marte resultan muy evidentes).

Acreción (o acrecimiento)
Es el "fenómeno por el cual materia, normalmente gas, es atraída por un cuerpo debido a la interacción gravitatoria y pasa a incorporarse al mismo, a veces tras un proceso que implica que el material gire alrededor del objeto central y que puede conllevar la formación de un disco".
Fuente
Sociedad Española de Astronomía. https://bit.ly/3dRMldO.

Finalmente, la Tierra quedó constituida por un núcleo muy denso de metales (con predominio de hierro y níquel) y un manto menos denso de silicatos (minerales que contienen silicio) que rodea externamente al núcleo (Figura 2).

Desarrollo de la historia terrestre: edades geológicas

La historia de la Tierra se divide en diferentes unidades temporales (eones y eras) que se pueden visualizar en la Tabla Cronoestratigráfica Internacional (Figura 3); durante tales eras se conformó el planeta Tierra que ahora conocemos. Con el transcurrir del tiempo se incrementó el oxígeno atmosférico y la biodiversidad (véase *La larga marcha del oxígeno en la Tierra: mortal para unos, indispensable para otros* en *Oikos=* 16), al menos hasta tiempos recientes.

La unidad temporal netamente terrestre más antigua se denomina Precámbrica y transcurrió hace entre -4,570 y -540 millones de años (contando hacia atrás; Figura 4). Es una época poco conocida. Durante el último periodo del Precámbrico (eón Proterozoico, desde -2,500 a -540 millones de años antes del presente) surgieron y comenzaron a evolucionar los seres vivientes a partir de bacterias y cianobacterias primitivas y simples, poco diferenciadas, que fueron dotando de oxígeno (O_2) a la atmósfera terrestre (Figura 4). A medida que el enfriamiento del planeta lo permitió, aparecieron otros organismos más complejos, como el plancton de las aguas superficiales (que iban enriqueciendo la atmósfera de O_2), algas eucariotas, incluso esponjas. En este eón Proterozoico comenzó la fragmentación de los continentes y se formaron los océanos; también ocurrieron las primeras glaciaciones. Por tanto, poco a poco (y simultáneamente) la atmósfera terrestre fue enriqueciéndose de O_2 (pues hasta entonces estuvo dominada por el metano y gases de azufre), lo cual permitió ampliar el abanico viviente de seres heterótrofos.

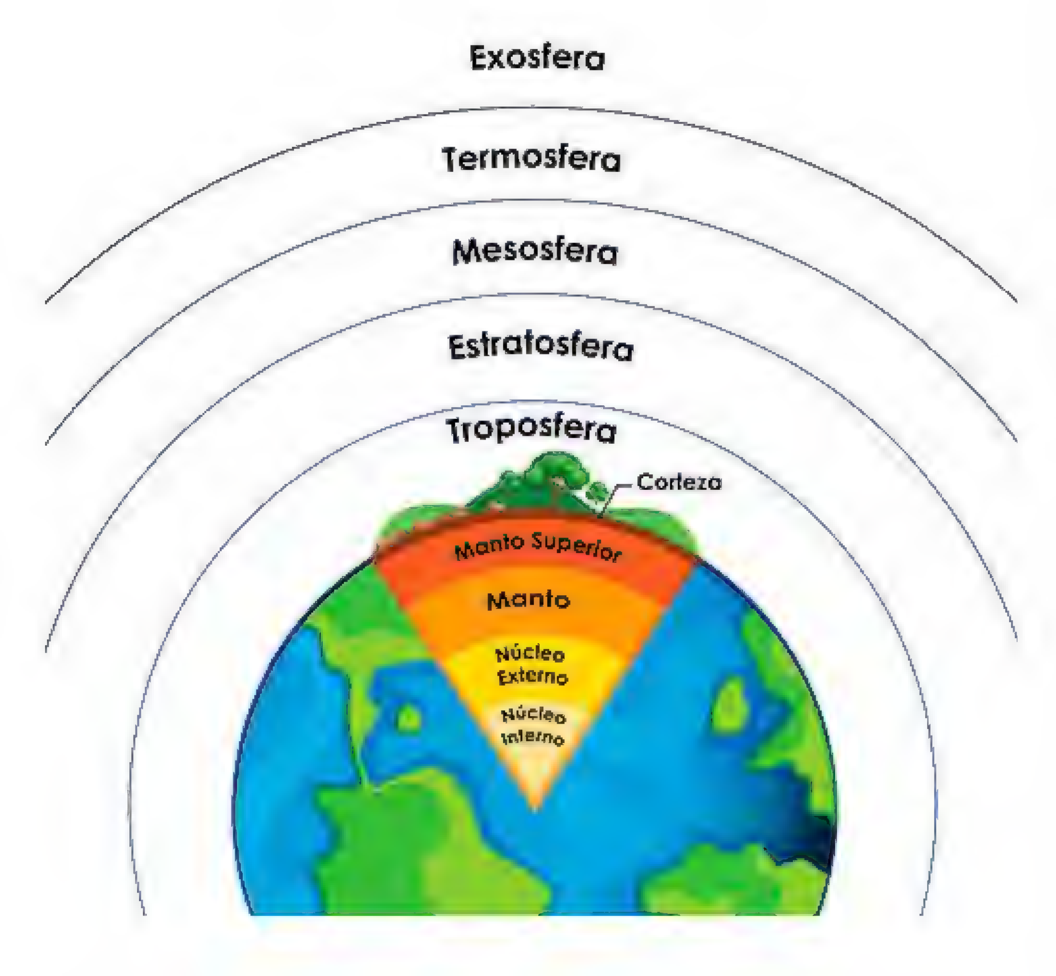


Figura 2. La Tierra está constituida por un núcleo muy denso de metales y un manto menos denso de silicatos que rodea externamente al núcleo. Imagen a partir de J. Kemp via Wikipedia.

Hace unos -2,500 millones de años (eón Proterozoico) pudieron existir "seudosuelos abióticos", es decir, falsos suelos que se conformaron a partir de arcillas, pero sin la presencia de humus ni microorganismos. Los falsos suelos, en rigor, no se pueden denominar suelos, dado que la formación de suelos exige presencia de vida (es uno de los factores para su formación), requisito para que sucedan procesos biogeoquímicos. Más tarde, hace aproximadamente -2,000 millones de años, se debieron conformar los primeros suelos rudimentarios (protosuelos) al sedimentarse sobre las rocas (ya frías o templadas) y regolitos (roca desmenuzada) los restos de bacterias quimiótrofas (véase el recuadro 1 Bacterias quimiótrofas) y algas, lo que permitió la existencia de vida microbiana heterótrofa. Desde ese momento el protosuelo (esto es, el suelo primitivo) ya comenzó paulatinamente a transformarse en un verdadero suelo al recibir, al igual que ahora, restos orgánicos. Los suelos verdaderos, ya con presencia microbiana, debieron aparecer posteriormente, hace unos -1,550 millones de años e irían, poco a poco, asemejándose a los suelos actuales.

Al Precámbrico le sucedió la era Paleozoica o Primaria (entre hace -500 a -250 millones de años), durante la cual aparecieron los primeros animales acuáticos más complejos y las plantas terrestres sin flores. Es de suponer que, con el advenimiento de hongos, briófitas (musgos y hepáticas) y plantas con raíces, se fueron acumulando más residuos orgánicos (o *necromasa*) que se mezclaron con los suelos primitivos, ya más desarrollados, esto es, más ricos en materia orgánica del suelo (MOS). Así se inició la formación de los primeros suelos, bastante similares a los actuales, esto es, sedimentos rocosos superficiales que contienen MOS (o *humus*), lo que permite el desarrollo y diversidad de vida microbiana con actividad heterótrofa. Como consecuencia de estos procesos se comenzó a producir anhídrido carbónico (CO_2, más conocido como dióxido de carbono); este CO_2, más la función fotosintética que comenzaba a desarrollarse en las plantas terrestres, permitió que los vegetales se estableciesen sobre los suelos primarios, a la vez que en los entornos, donde las rocas liberaban calcio (Ca) durante su descomposición, con lo que se comenzaron a formar los primeros horizontes de carbonato cálcico ($CaCO_3$).



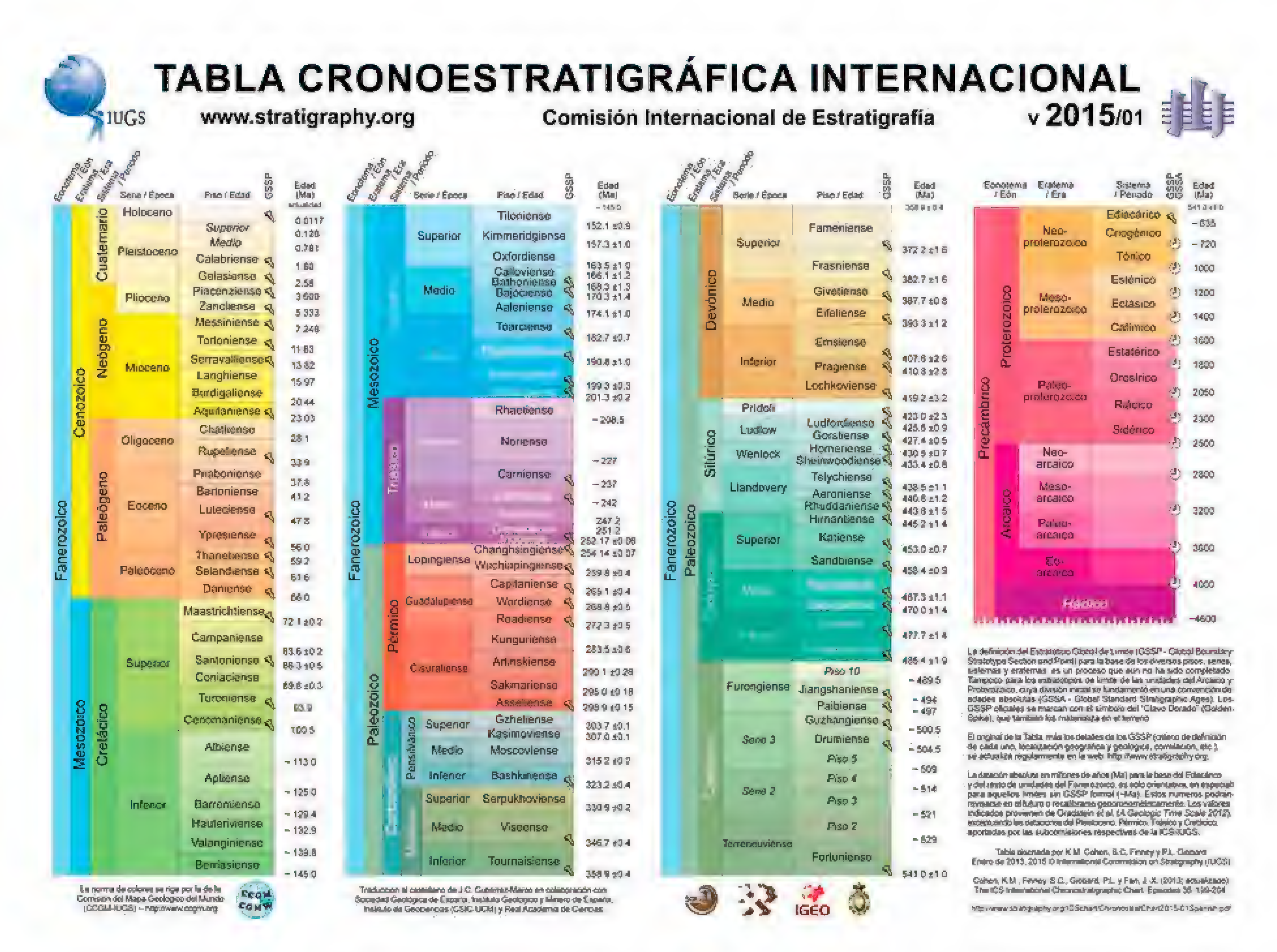


Figura 3. La unidad temporal netamente terrestre más antigua, se denomina Precámbrica y transcurrió entre 4,570 y 540 millones de años atrás. La tabla estratigráfica internacional es producida por la Comisión Internacional de Estratigrafía quienes definen las unidades del tiempo geológico. Imagen: https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2022-02Spanish.pdf).

Bacterias quimiótrofas

Son aquellas que viven de la energía liberada en los procesos químicos que están de desequilibrio. Oxidan amoniaco en presencia de O_2, pero reducen el nitrato en ausencia del mismo. Por tanto, no viven de residuos orgánicos; igualmente oxidan sulfuros o los forman en función de la presencia o ausencia de O_2 (respectivamente, esto es, en función del potencial de oxidoreducción).

Como consecuencia de estos cambios ambientales, durante el periodo Cámbrico (entre -541 y -485 millones de años de la era Primaria) pudieron aparecer y evolucionar los primeros herbívoros o saprófagos, principalmente moluscos y trilobites. En el Ordovícico (entre -480 y -460 millones de años) algunos grupos de animales (inicialmente anfibios, surgidos por evolución de seres acuáticos) evolucionaron hacia animales no acuáticos y aparecieron los artrópodos (por evolución de algunos crustáceos); todos ellos comenzaron a colonizar los ambientes terrestres; así, en el periodo Carbonífero (entre -360 y -286 millones de años desde el presente) se generó una gran diversidad de insectos gigantes.

Desde el punto de vista edáfico, la era Paleozoica fue vital para el desarrollo de los suelos. Al inicio los protosuelos se fueron enriqueciendo lentamente con restos vegetales (aproximadamente hacia -400 millones de años atrás), para luego transformarse o evolucionar con la ayuda de hongos saprófagos, lo que sirvió para incrementar la cantidad de MOS que se acumulaba en el suelo por aportación de residuos orgánicos de origen animal que comenzaron a colonizarlo.

Con la formación de los suelos ricos en MOS (al ser los suelos poblados por, cada vez, mayor diversidad de microorganismos o *microbiota*) se iniciaron los ciclos biogeoquímicos (véase el numero 16 de *Oikos*=), más activos a medida que los suelos se conformaban y evolucionaban hacia las etapas más desarrolladas, como las que actualmente conocemos.

Con el establecimiento de tales procesos biogeoquímicos las plantas se fueron diversificando al poder tomar nutrientes del suelo. Se estima que la aparición de las leguminosas (familia vegetal que incluye los frijoles) ocurrió tempranamente durante el citado periodo Paleozoico. En otros casos, las plantas formaron

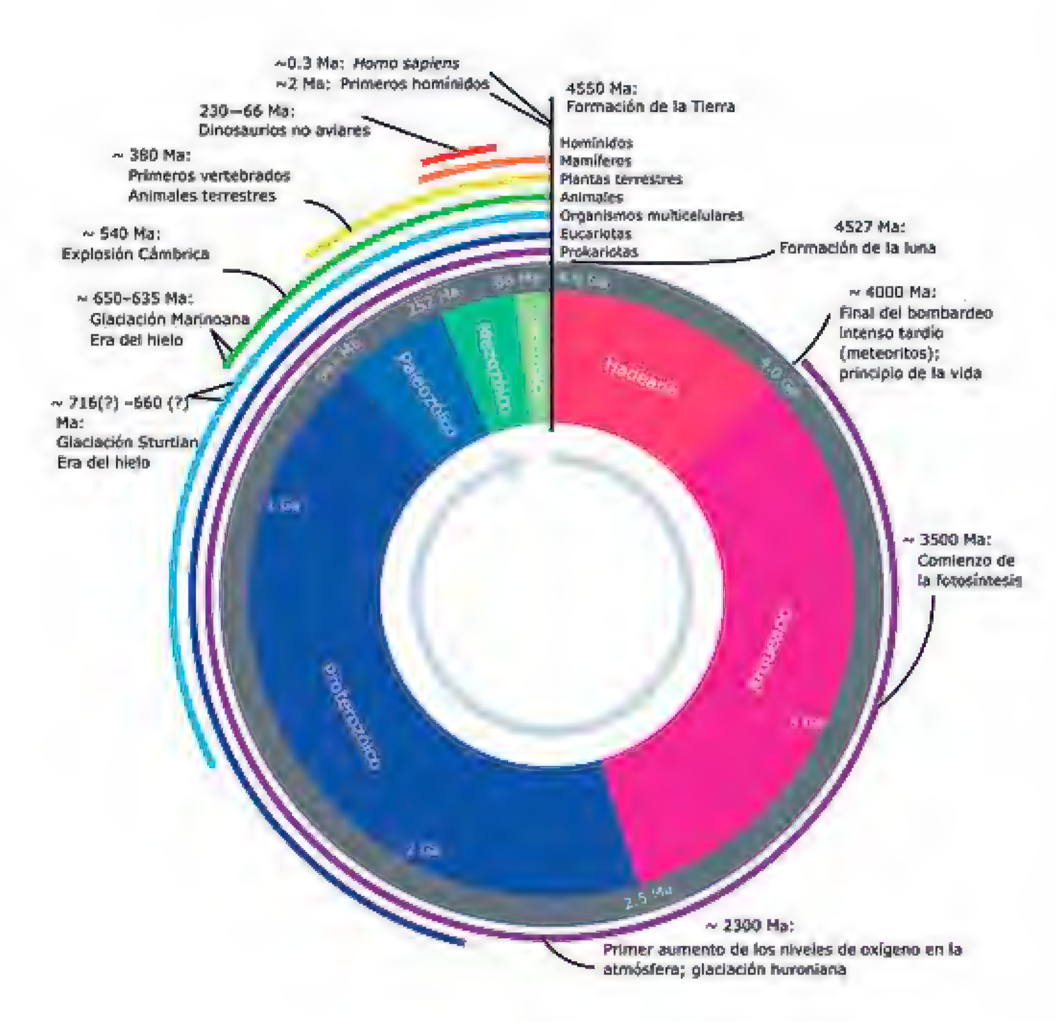


Figura 4. Durante la Era Mesozoica o Secundaria, que se ubica en un periodo de entre -252 y -66 millones de años desde el presente, las plantas evolucionaron, apareciendo las que producen flores. Esta Era se inició con una gran extinción de especies y terminó, en el Cretácico tardío, con otra extinción. Imagen: Leonidl via Wikimedia Commons.

asociaciones con hongos, dando paso a la evolución de las micorrizas (véase *El halo infinito de la química: los hongos del suelo y los ciclos biogeoquímicos* en *Oikos*= 25). Se estima que los actuales suelos colonizados por raíces podrían haber aparecido hace -364 millones de años, teniendo su máximo apogeo durante el periodo Carbonífero.

Durante la era Mesozoica o Secundaria, que se ubica en un periodo de entre -252 y -66 millones de años desde el presente, las plantas evolucionaron y aparecieron las que generan flores. Esta era se inició con una gran extinción de especies (Figura 4) y terminó en el Cretácico tardío con otra extinción. Esta última es la más conocida (la de los grandes saurios, algunos reptiles y los *Ammonites*), debiéndose probablemente a la caída de un gran meteorito.

La Tierra siguió configurándose hacia lo que ahora conocemos como nuestro planeta. Los suelos cobraron cada vez más importancia porque en gran parte del planeta soportaban una vegetación exuberante que permitía la alimentación de los grandes saurios herbívoros. Algunos investigadores denominan estos suelos como "biofísicos", porque soportan más de 90% de la biodiversidad terrestre y se habrían formado hace alrededor de -91 millones de años (Cretácico superior).

Durante la era Cenozoica o Terciaria (que transcurrió desde -66 a -2.6 millones de años) se presentaron y evolucionaron las primeras especies de mamíferos terrestres y marinos, que antecedieron a la aparición de los simios. En ese periodo se consolidaron superficies terrestres estables, donde se conformaron suelos más desarrollados, algunos de los cuales fueron heredados en la siguiente era. Estos suelos serían los actuales *paleosuelos* (suelos antiguos, heredados o relictos), mientras que otros se degradaron por extrema acidificación, salinidad o erosión natural. Algunos expertos en el estudio de los suelos (o edafólogos) estiman que durante el Cenozoico (hace unos -50 millones de años) ya existían 28 clases diferentes de suelos (Figura 5).

Hace unos -4.5 millones de años evolucionó entre los simios un anuncio de lo que sería la especie humana, el *Australopithecus* (Figura 6, evolución de los humanoides), que tuvo escasa incidencia sobre los suelos porque fue un simple recolector (no agricultor); sólo medía 1.5 m de alto, pesaba entre 33 y 65 kg y sus poblaciones eran pequeñas. Se cree que ya tenían lenguaje articulado y que inventaron herramientas. Al finalizar el Cenozoico convivió con el *Homo habilis*, un humanoide que tuvo la capacidad (o habilidad) de perfeccionar herramientas, género que evolucionará durante el Pleistoceno (la primera parte de la era Cuaternaria).

Durante la era Cuaternaria (era actual, que dio inicio hacia -2.6 millones de años) evolucionaron diversas especies de homínidos (género *Homo*), tales como el *H. erectus* y *H. neanderthalensis* (Figura 6) y posteriormente, hace unos 300,000 años surge el actual *H. sapiens*, (Cuaternario tardío, Holoceno).

Con este último *Homo* comenzó la degradación acelerada de los suelos por la actividad antropozoogénica (esto es, la influencia humana y del ganado que implica, por ejemplo, la manipulación del suelo para actividades como la siembra y el apisonado por los animales confinados en un área determinada). La degradación de los suelos fue y es perceptible, en general, por la pérdida paulatina del contenido de *humus*. Esa pérdida paulatina de MOS se produjo a veces por las concentraciones humanas que, se piensa, provocaron las primeras grandes migraciones de poblaciones de homínidos. Por tanto, se especula que la degradación inicial de



Figura 5. Número de tipos de suelos según periodos Geológicos. Imagen modificada de *Soil Cover of the World* por R. Dudal *et al.*, 1990.



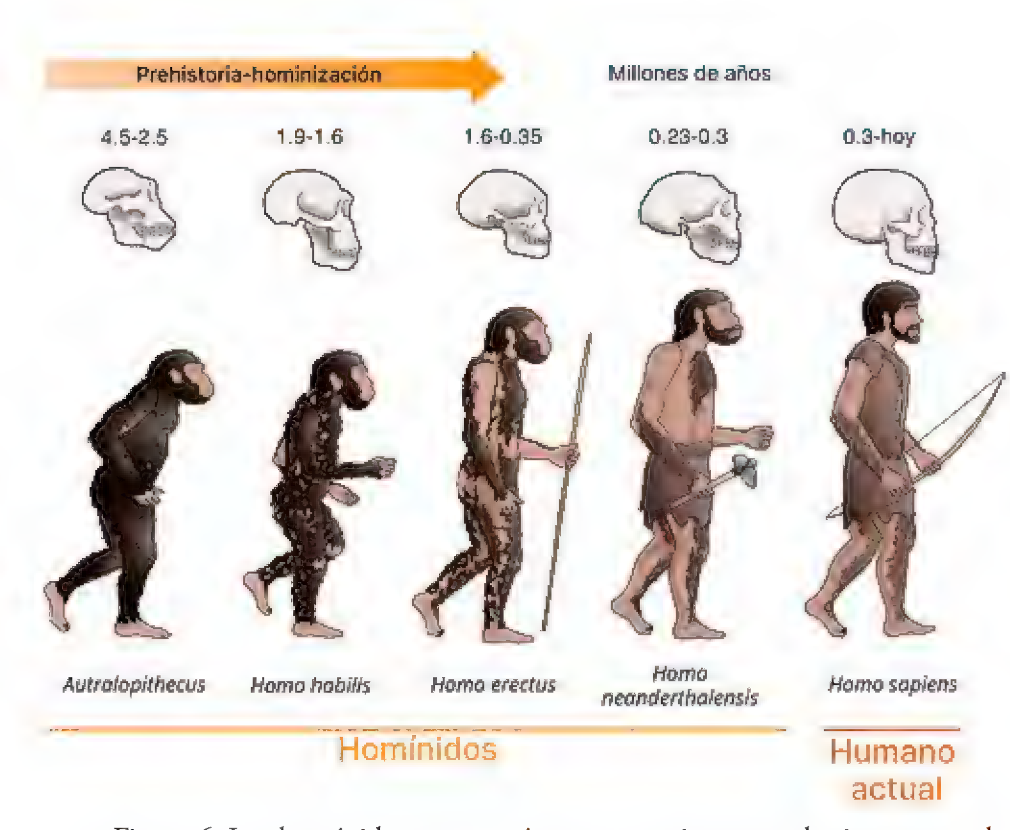


Figura 6. Los homínidos en sus orígenes no tuvieron mucho impacto en los suelos de nuestro planeta. Cuando surgió el *Homo sapiens*, alrededor de 300,000 años, comenzó la degradación acelerada de los suelos por la actividad antropozoogénica. Imagen elaborada por Ixchel Rocha.

los suelos y la pérdida progresiva de su poder productivo fueron causadas por la erosión o degradación física de los suelos tras la pérdida de su contenido original de MOS. En otras ocasiones esa degradación edáfica fue producto de la salinización, esto es, por el aumento del contenido en sales (lo que provoca un cambio negativo de las condiciones fisicoquímicas del suelo). Una de las etapas finales de la degradación edáfica puede ser la denominada *desertificación*, observándose una drástica pérdida de las condiciones y de la diversidad biológica. Esta etapa afecta negativamente a los seres humanos y los animales porque la mayoría de las veces deben abandonar ese territorio degradado que, ante la pérdida de su capacidad como recurso, se desertiza (tras la desertificación suele suceder una desertización).

Además de la pérdida de las condiciones químicas y físicas, el suelo puede sufrir degradación biológica por causas naturales. Contrariamente a lo que se piensa la naturaleza es dinámica, nunca estática: un estado de *clímax* es solo transitorio, aunque perdure durante muchas generaciones humanas, de ahí la confusión. En general la situación climácica sigue evolucionando hacia su degradación, que en el caso de los suelos significa la intensificación de la acidez (como en los trópicos y zonas frías) o hacia la acumulación de sales (en las regiones semiáridas); el problema surge en saber distinguir entre degradaciones naturales aparentes y aquellas provocadas por las acciones antrópicas.

Durante el Pleistoceno y Holoceno también se fueron extinguiendo múltiples especies, entre ellas homínidos (a saber, el *Australopithecus*, el *H. habilis*, *H. erectus* y *H. neanderthalensis*); no cabe duda de que en algunas de esas extinciones contribuyó y desempeñó un papel activo el *H. sapiens*. Ese papel activo del humano exterminador de especies (tanto vegetales como animales) se fue agravando a medida que transcurrió el Holoceno, porque se favoreció el crecimiento de especies domésticas en detrimento de las especies "no útiles", como consecuencia indirecta de la explosión demográfica humana y la contaminación que producen las sociedades tecnológicamente "avanzadas". Es oportuno recordar aquí que la contaminación no se elimina, sólo se traslada (lo que se entiende como "limpieza").

Como se puede colegir el proceso desde el inicio de la formación de la Tierra hasta el momento actual ha sido lentísimo, medible a escala temporal de miles de millones de años, mientras que la formación de los suelos que podemos observar actualmente no pasa de millones de años en los más viejos por la propia geodinámica terrestre. Por el contrario, la presencia del hombre actual en la Tierra es relativamente muy reciente (en todo caso inferior al medio millón de años); sin embargo, su actividad ha impactado de manera muy acusada (en algunos casos de manera gravísima) sobre la permanencia de los suelos. Y esa es la gran tragedia de la especie humana, que mientras sigue multiplicándose, los suelos aptos para el cultivo se han venido reduciendo significativamente en forma casi exponencial, sin ya tener nuevas tierras que "descubrir" para poder compensar la pérdidas edáficas. Por tanto, el gran reto humano estriba en la conservación de los suelos o la recuperación de aquellos que fueron degradados hasta convertirlos en infértiles, cuando no han perdido sus apreciados horizontes superficiales.

Jorge D. Etchevers pertenece al Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco (México).

Juan F. Gallardo es Profesor de Investigación del C.S.I.C. y Titular de Universidad (jubilado). Salamanca (España).

Para saber más

- Cotler H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. (2007). La conservación de suelos: Un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83 (abril-junio): 5-71. https://www.redalyc.org/pdf/539/53908302.pdf
- Etchevers J.D., H. Cotler y C. Hidalgo. (2020). Salir de la invisibilidad: Nuevos retos para la Ciencia del Suelo. *Terra Latinoamericana*, 38: 931-938. DOI https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867.
- Gallardo, J.F. (2020). ¿Sabes qué es un suelo? Revista MIX-TEX, 1: 108-112. *www.mixtec.utim.edu.mx*.
- Gallardo, J.F. (2016). Conceptos de suelos y proyecciones de investigación futuras. En: G. Cruz Flores y A.B. López López, *Redescubriendo el suelo: Su importancia ecológica y agrícola*. FES. Zaragoza, UNAM, Ciudad de México. Pp.: 15-18. http://hdl.handle.net/10261/139876
- SEMARNAT. Suelos. https://bit.ly/3RfdDJS. Consultado 30/VI/2021.

Del progresivo impacto de *Homo sapiens sapiens* sobre el suelo

Jorge D. Etchevers y Juan F. Gallardo

El suelo y la humanidad

El inicio de los impactos del *Homo sapiens* sobre la naturaleza fue hace unos 50,000 años (ya en el Holoceno); ese impacto se ha incrementado a medida que su inicial nomadismo se convertía en sedentarismo, gracias a la agricultura que permitía un exceso de alimentos que, a su vez, aseguraba la permanencia y domesticación de animales como el perro (*Canis familiaris*) o la oveja (*Ovis orientalis aries*), no pocas veces acuciado por la paulatina escasez, incluso desaparición, de los animales que antes cazaban durante la etapa de nomadismo.

En el inicio de la agricultura se debieron roturar los suelos cercanos a los cursos fluviales (donde los grupos humanos se asentaban por la necesidad de agua potable), generalmente de textura arenosa, fácil de labrar (esto es, suelos tipo *Fluvisoles* y *Cambisoles gleizados*); en las zonas con estación seca (con suelos áridos, *Aridisoles*, incluso con aparición de suelos salsódicos) la presencia de agua cercana era indispensable para la supervivencia. Un ejemplo de este tipo de suelos son los que rodean al Éufrates y al Tigris, donde surgió la cultura mesopotámica; o bien los del Nilo bajo, cerca de su desembocadura, donde se desarrolló la cultura egipcia (Figura 1). El crecimiento progresivo de la población obligó a los humanos a cultivar otros tipos de suelos como consecuencia de nuevos establecimientos o el crecimiento de asentamientos humanos permanentes en lugares distintos de los iniciales, situados ahora en terrazas bajas fluviales; ello sólo fue posible tras la invención del arado y la domesticación de los burros o bueyes, que suplieron la fuerza humana (como sucedió en Europa o China). Pero en el continente americano, al haberse extinguido los équidos (grupo al que pertenecen los caballos) y ante la falta de bueyes (los bisontes eran inservibles) la agricultura dependía de la fuerza humana (a veces esclavizada) o, bien, se logró localmente la ayuda puntual de algún animal de carga (como los camélidos andinos).

Los arados ya eran operativos en la civilización egipcia (Figura 1), aunque debieron ser perfeccionados por los romanos.

> **Gleizado**
> *Significa que tiene una capa freática cerca de la superficie, como suele pasar en las terrazas bajas de los ríos; por ello es fácil hacer pozos y, a veces, regar menos por el fenómeno de ascensión capilar hídrica.*



Figura 1. Escena de labranza de la tumba de Sennedjem. Imagen: *The Yorck Project* via Wikipedia.

Casi al inicio de la era cristiana, Lucius Junius Moderatus Columella (-4 a.C. a 70 d.C.) escribió el primer tratado de agricultura conocido (12 volúmenes), donde señalaba que, ya en esos tiempos, el estercolado era práctica común; esto es, ya se detectaban señales de degradación química y, probablemente, de erosión física, que era controlada mediante la citada práctica. Las poblaciones humanas no eran abundantes debido a las recurrentes epidemias que limitaban la explosión demográfica, además de las continuas guerras y matanzas entre tribus, nobles y reyes; las clases dominantes (aristócratas, señores de la guerra y alto clero) demandaban la producción de alimentos, por lo que incentivaban la agricultura en sus tierras o nuevas tierras conquistadas, generalmente a cargo de siervos o esclavos casi sin distinción de culturas.

Como se deduce por lo indicado, la relación entre las sociedades primitivas y la naturaleza, en especial respecto al importante recurso natural llamado suelo, era de cierto equilibrio, debido a su bajo número demográfico (población controlada por epidemias y guerras) y a su escaso consumo de alimentos (con la obvia excepción de la nobleza y alto clero). Este hecho es importante recalcarlo, pues casi nunca se tiene en cuenta en las comparaciones de los impactos humanos en la actualidad y el pasado, por lo que se tiende a dar por buena la errónea afirmación de que "cualquier pasado fue mejor y más respetuoso con la naturaleza"



(el respeto era y es más o menos el mismo, esto es, casi ninguno, pero antes eran muchos menos personas).

El descubrimiento de otros continentes y el reparto del mundo por los europeos (primero América por los españoles y portugueses y, luego, África y gran parte de Asia entre Francia e Inglaterra, con menor participación de alemanes, holandeses, belgas, portugueses y españoles) frenó la presión sobre la tierra en Europa, al intentar y lograr poner en cultivo las nuevas tierras "descubiertas" (eufemismo de apropiadas violentamente). Por otra parte, la llegada de nuevas especies vegetales desconocidas en Europa, en especial la papa o patata, y la mejora de la salud (tras la difusión del jabón como base de la higiene personal) permitieron la explosión demográfica europea que compensaba la emigración (a veces masiva en los años de hambruna o guerras) a los "nuevos" territorios. Se dio la circunstancia que grandes sectores poblacionales europeos dependieron en gran medida de las cosechas del citado tubérculo (desconocido hasta el siglo XVI en Europa), esto es, de las patatas (papa andina mejorada genéticamente), causando las malas cosechas terribles hambrunas y emigraciones (como sucedió en Irlanda, Dinamarca, Rusia o Polonia).

Un error garrafal de los colonizadores europeos produjo grandes desastres edáficos, especialmente en las llanuras bajas tropicales (África Occidental y Brasil). Los europeos, oriundos de clima templado, observaron (en sus sitios de origen) que un arbolado abundante en las llanuras significaba gran fertilidad. Muchas áreas llanas de bosques de los nuevos territorios tropicales fueron taladas para instalar una agricultura "rentable" (hoy día diríamos de forma "sostenible"). Actualmente esas zonas se han convertido en extensas áreas de lateritas rojas (derivadas de los precedentes *Ferralsoles* y *Plintisoles*, *Oxisoles* en otras clasificaciones) sin una brizna de hierba, puesto que eran suelos pobres de materia orgánica del suelo (MOS) que, al impactar directamente el sol, se endurecieron de forma irreversible formando las llamadas "corazas ferralíticas o lateríticas".

Por desgracia, no fue sino hasta finales del siglo XIX cuando apareció la Edafología, a saber, la disciplina científica que estudia los suelos, inicialmente de manos de un grupo de geógrafos y geólogos rusos dedicados a valorizar las tierras. Hoy se tienen suficientes conocimientos para evitar desastres similares (obviamente, si existe educación, formación científica y planificación suficiente). No pocas de las agriculturas ancestrales que se ponen de modelo han causado grandes erosiones (en especial en las zonas andinas o montañosas mesoamericanas), no tanto por las prácticas agrícolas en sí, sino por el sobrepastoreo o hábitos incorrectos asociados. Un ejemplo de ello se puede apreciar en la Mixteca Alta (Oaxaca, México).



Figura 2. El uso de tecnologías como el tractor provocan la pérdida de materia orgánica del suelo, aceleran su erosión, lo compactan y contribuyen a la emisión de CO_2. Fotografía: J.F. Gallardo Lancho.





Figura 3. Los malpaíses son paisajes tormentosos donde apenas quedan restos de suelos entre grandes cárcavas. Fotografías: J.F. Gallardo Lancho.

Malpaís
Los malpaíses se forman por la pérdida del recurso suelo por diversas causas, formándose paisajes tormentosos donde apenas quedan restos de suelos entre grandes cárcavas. En México existen malpaíses de lavas en el Paricutín y se ven malpaíses de fuertes erosiones en forma de tepetates en todo Tlaxcala, Michoacán o Puebla.

Antes del uso de tractores y otras máquinas las pérdidas de MOS se compensaban parcialmente por la adición al suelo de las heces o boñigas (más o menos estercoladas) de los animales domésticos. El equilibrio romano del arado de yuntas, compensado por el estiércol añadido, se rompió con la aparición de los tractores (Figura 2). En consecuencia, a medida que se expandía el uso masivo de tractores a partir de 1930 (la FAO señala que, por ejemplo, entre 1960 y 1990 se duplicó el número de tractores en el mundo), la pérdida de MOS aumentó por la falta de aportes de residuos orgánicos; tras ello se desató la erosión acelerada (antrópica) de los suelos sometidos a mecanización. La utilización del arado mecánico arrastrado por tractores trajo consigo la pérdida de MOS y la erosión acelerada, producida por la oxigenación que promueve el laboreo (promoviendo, además, la emisión de CO_2; Figura 3).

En consecuencia, se puede decir que el desastre de la erosión edáfica acelerada provino de la mecanización concomitante con la revolución industrial. La situación original del uso del

Suelos volados
Se les denomina a los suelos que son muy sensibles a los vientos y en cuanto sopla se erosionan eólicamente, originando nubes de polvos.

suelo, que se había mantenido casi estable desde el origen de la agricultura, cambió drásticamente cuando, por ejemplo, los norteamericanos promovieron la diversificación mecánica al poner en cultivo las extensas llanuras (grandes praderas), especialmente tras la Primera Guerra Mundial, cuando la mecanización ya era imparable: A partir de 1930 comenzaron a sufrirse recurrentemente tormentas de polvo (algunas de ellas alcanzaron la costa atlántica; Figura 4); hoy día se han atenuado por el cambio hacia la labranza reducida, que mantiene el suelo cubierto por un lecho de rastrojo, denominado en inglés *mulch*.

Los paisajes cambiaron tremendamente y en muchas áreas aparecieron grandes surcos erosivos (los malpaíses de los climas mediterráneos y de orografías colinadas), y en otras, como se ha citado, tormentas eólicas (p. ej., en Argentina se conocen como "suelos volados", característicos de las llanuras continentales cultivadas, Figuras 4 y 5) que sólo se han atemperado con la agricultura de labranza reducida, donde la rastrojera permanente evita el efecto erosivo de la lluvia y el viento (Figura 6). También la extensión casi exponencial del regadío desde el decenio de 1940 ha mejorado la conservación de los suelos, ya que acrecienta indirectamente el contenido de MOS, aunque muchas veces conlleva la contaminación de las aguas; por suerte esta contaminación se



Figura 4. Las tormentas de polvo son resultado de procesos erosivos
Fotografía: J.F. Gallardo Lancho.



Figura 5. Efecto de la labranza mecanizada sobre el suelo en las pampas.
Fotografías: J.F. Gallardo Lancho.





Figura 6. Tractor laborando. Al promover la agricultura mecánica la situación original del uso del suelo cambió drásticamente. Hoy día países como Estados Unidos de Norteamérica han promovido la agricultura de conservación en sus extensas llanuras. Fotografía: J.F. Gallardo Lancho.

ha atenuado (aunque no desaparecido) con el establecimiento del sistema de riego gota a gota. Pero no hay que olvidar que la mayor parte de las obras de puesta en riego exige allanamientos o aterrazamientos, esto es, grandes movimientos de tierras que impactan gravemente sobre los suelos preexistentes.

En América (en especial la región andina y en el México de las Sierras Madre), la milpa (asociación de maíz con leguminosas, cucurbitáceas y otras especies) no debería ser erosiva en principio, pero la explosión demográfica de las poblaciones humanas nativas (tras haber creado resistencia a las enfermedades venidas desde Europa), unida al pastoreo agotante por los animales domésticos traídos al nuevo continente por los españoles (no había animales confinados antes de su llegada), desató un aumento de los procesos erosivos acelerados. Estos se acrecentaron con la intensificación de la explotación del suelo por la agricultura y la ganadería, y hoy son evidentes los frecuentes malpaíses, como los que se vislumbran en las numerosas áreas del continente americano (Figura 3).

Además, en el caso particular de México hay que sumar a lo anterior las extensas áreas de tepetates (cenizas volcánicas endurecidas) que ya los primeros españoles que desembarcaron en México observaron en su caminar desde Veracruz hasta Tenochtitlán. Igualmente, en los páramos andinos, la papa sembrada sobre suelos volcánicos (Andisoles) no debió ser demasiado agresiva inicialmente por lo limitada de la población humana; pero la explosión demográfica (especialmente durante el siglo xx) ocasionó la expansión de las cangahuas (equivalente a los tepetates) por un mal manejo, o bien el cultivo de suelos impropios, muy sensibles a la erosión tras la desforestación, como se puede observar en las áreas cultivadas del Corredor Andino. Por otra parte, los suelos volcánicos del Cono Sur fueron gravemente afectados tras las talas masivas a matarrasa (a ras del suelo) de la vegetación nativa, cuando no por los fuegos provocados por los ganaderos tratando de ensanchar atolondradamente sus praderías. Todas esas extensiones son hoy desiertos humanos, y si aún permanecen habitadas, son reservas de pobreza.

En suma, cuando se pierde el suelo de un territorio, el territorio (y con ello la población humana) se pierde.

Jorge D. Etchevers pertenece al Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco (México).

Juan F. Gallardo es Profesor de Investigación del C.S.I.C. y Titular de Universidad (jubilado). Salamanca (España).

Para saber más

- Cotler H., E. Sotelo, J. Domínguez, M. Zorrilla, S. Cortina y L. Quiñones. (2007). La conservación de suelos: Un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83 (abril-junio): 5-71. https://www.redalyc.org/pdf/539/53908302.pdf
- Etchevers J.D., H. Cotler y C. Hidalgo. (2020). Salir de la invisibilidad: Nuevos retos para la Ciencia del Suelo. *Terra Latinoamericana*, 38: 931-938. DOI https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.867.
- Gallardo, J.F. (2020). ¿Sabes qué es un suelo? Revista MIX-TEX, 1: 108-112. *www.mixtec.utim.edu.mx*.
- Gallardo, J.F. (2016). Conceptos de suelos y proyecciones de investigación futuras. En: G. Cruz Flores y A.B. López López, *Redescubriendo el suelo: Su importancia ecológica y agrícola*. FES. Zaragoza, UNAM, Ciudad de México. Pp.: 15-18. http://hdl.handle.net/10261/139876
- SEMARNAT. Suelos. https://bit.ly/3RfdDJS. Consultado 30/VI/2021.